

Académie des Technologies - Commission Energie et changement climatique

mardi 15 janvier 2013



Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Scénarios de transition énergétique 2050 pour la France :
réflexion prospective pour l'élaboration d'une transition intelligente

Nadia Maïzi

Centre de Mathématiques Appliquées, MINES ParisTech



Transition vers une société bas carbone



Préconisations pour un système peu émissif

Solutions en génération

- ☞ *Sources renouvelables et distribuées* sont des solutions alternatives attractives
- ☞ *Le nucléaire* est présenté comme une technologie zero-émission
- ☞ *Les technologies de capture et de stockage* présentent des opportunités majeures pour certaines régions

Instruments et Politiques

- *Instruments de marchés* (carbone, électrique, ...) : taxes, prix, subventions, ...
- *Engagements nationaux* : loi POPE 13/07/2005, Grenelle, facteur 4, RT, ...
- *Engagements internationaux* : 3x20, post Cancùn, ...
- *Orientations de la Politique nucléaire*

Préconisations pour un système peu émissif

Solutions en génération

- ☞ *Sources renouvelables et distribuées* sont des solutions alternatives attractives
- ☞ *Le nucléaire* est présenté comme une technologie zero-émission
- ☞ *Les technologies de capture et de stockage* présentent des opportunités majeures pour certaines régions

Instruments et Politiques

- *Instruments de marchés* (carbone, électrique, ...) : taxes, prix, subventions, ...
- *Engagements nationaux* : loi POPE 13/07/2005, Grenelle, facteur 4, RT, ...
- *Engagements internationaux* : 3x20, post Cancùn, ...
- *Orientations de la Politique nucléaire*

Les enjeux techniques des nouveaux paradigmes

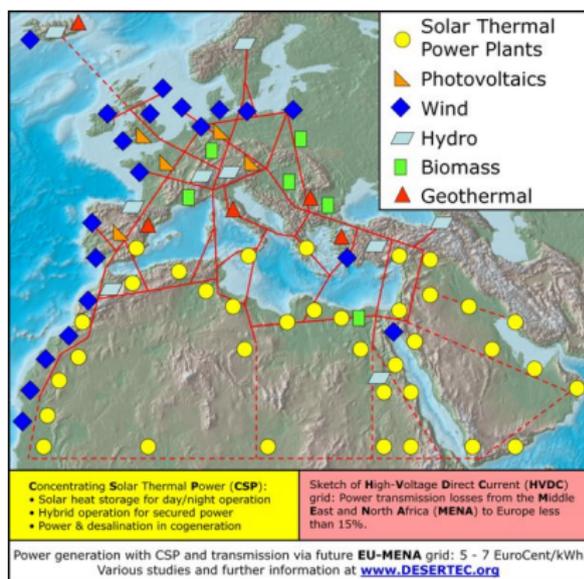


Figure: Production d'électricité tout renouvelable en 2050. Source: DESERTEC.

Solutions techniques

- des solutions intégrées
 - *Efficacité énergétique*
 - Solutions *intelligentes* : grids, MDE, eau, ville durable ...
- *intégration de l'intermittence à grande échelle* ;
- *Mobilité* : électrique, biocarburants,..
- *réseau centralisé/réseau décentralisé.*

Elaborer une transition énergétique intelligente

Souhaitable, Plausible, Soutenable

Débrouiller l'imbraglio de recommandations techniques et politiques à travers une réflexion sur le long terme, hors des cercles de décision, sans cesse revisitée et qui permette :

- de réconcilier les échelles de temps et d'espace
- de prendre en compte des externalités
- d'évaluer globalement les impacts des solutions prônées
- d'effectuer les arbitrages nécessaires tenant compte des compétitions et des substitutions

MarkAI/TIMES : outil pour une prospective du long terme

"What we have the right to ask a conceptual model is that it seize on the strategic relationships that control the phenomenon it describes and that it thereby permit us to manipulate, i.e., **think about the situation**"

Source: R. Dorfman, P. A. Samuelson, R. M. Solow



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Compétitions, substitutions et cohérences préservées

TIMES

Un modèle technologique d'optimisation linéaire, ouvert, développé dans le cadre de l' ETSAP (AIE)

- piloté par la demande
- sur un horizon certain : moyen ou long terme (50/100 ans)
- dont l'objectif est la minimisation du coût total actualisé du système énergétique

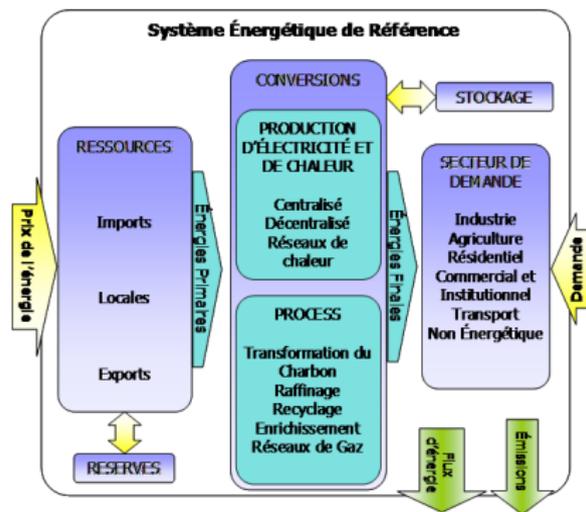


Figure: modèle bottom-up TIMES The Integrated MarkAl (market allocation)-EFOM System

- 1 dont les flux sont équilibrés
- 2 les limites de fonctionnement respectées
- 3 le système électrique dimensionné correctement (réserves de pointe, ...)

De l'usage des scénarios : le modèle n'est pas une fabrique

- Plutôt que d'user de scénarios déjà en stock
- chaque interrogation nécessite de puiser dans un flux de scénarios élaborés spécifiquement afin de proposer les options d'un futur

Souhaitable, Plausible, Soutenable

Allocation d'activités ou de ressources

L'objectif visé

établir le programme de production x_1, \dots, x_n de façon à maximiser le profit total, compte tenu des contraintes de limitation des facteurs de production et de satisfaction de la demande.

Ce programme s'écrit sous la forme du (PL)

$$\max_{x_j} z = \max_{x_j} \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m \quad x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_j x_j \geq D$$

MARKAL-Times un modèle technologique

Motivations pour le choix de MARKAL-Times

- une représentation technologique très **détaillée**
tant pour les technologies existantes que pour les technologies du futur
- modèle **ouvert**
- développé dans le cadre de l'**ETSAP** :
Energy Technology Systems Analysis Programme de l'AIE (depuis 1980)

MARKAL-Times un modèle technologique

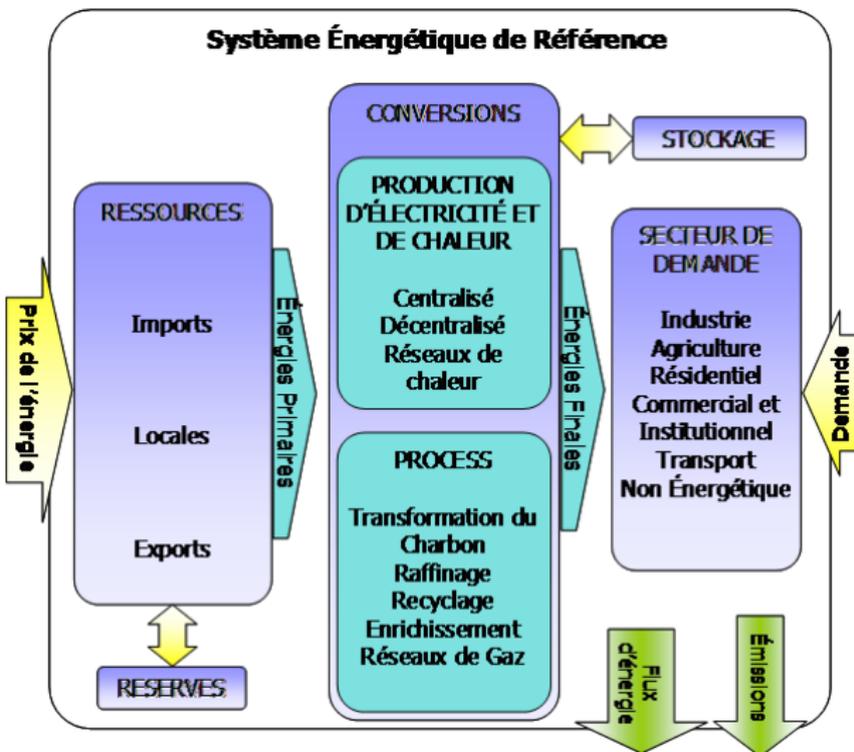
Le modèle MARKAL-Times

Un modèle technologique d'optimisation linéaire piloté par la demande

MARKAL-Times réalise une **optimisation technico-économique**

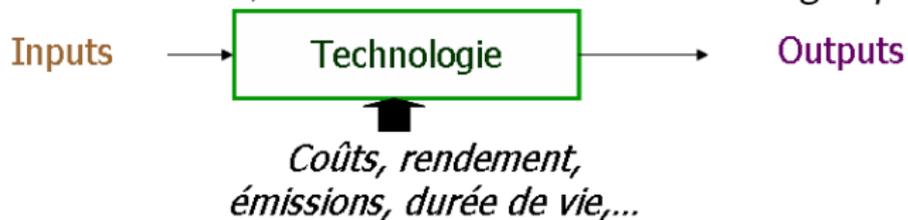
- 1 pour la **chaîne énergétique de référence** (RES):
 - de l'amont (production et offre énergétique)
 - à l'aval (secteurs économiques utilisant l'énergie finale)
- 2 pilotée par **la demande** et soumis à contraintes
- 3 sur un **horizon certain** : moyen ou long terme (20/50/100 ans)
- 4 pour un **objectif** : technique/économique/environnemental : (coûts économiques, émissions de polluants, ...)

Le système énergétique de référence



La structure du RES

Les briques élémentaires, convertisseurs de vecteurs énergétiques



La structure du RES

Les briques élémentaires, convertisseurs de vecteurs énergétiques



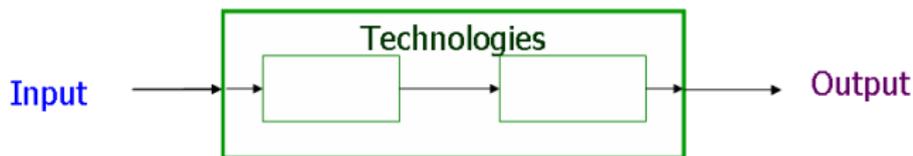
centrale thermique: **input**=charbon, gaz ou fuel, **output**=électricité

raffinerie: **input**=pétrole brut, **output**=produits raffinés

lampe : **input**=électricité, **output**=demande utile d'éclairage (lumens ou $W.m^2$)

La structure du RES

Les briques élémentaires, convertisseurs de vecteurs énergétiques



sont **assemblées, désagrégées**

Un exemple de désagrégation hiérarchique

Du pétrole au passager

Entrée = pétrole importé

→ **Sortie** = demande finale annuelle km.passager

Un exemple de désagrégation hiérarchique

Du pétrole au passager

Entrée = pétrole importé

→ techno raffinerie

→ super 98

→ techno distribution

→ super 98 dispo à la pompe

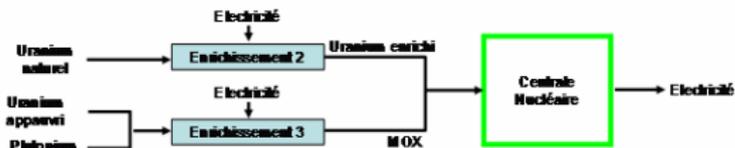
→ techno voiture

→ **Sortie** = demande finale annuelle km.passager

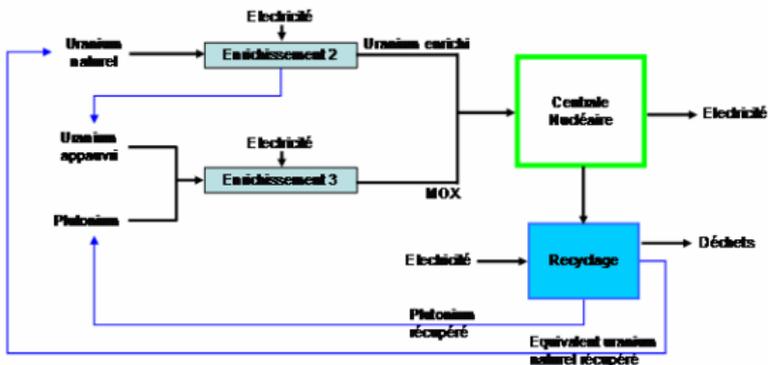
Une désagrégation technologique



Niveau 1

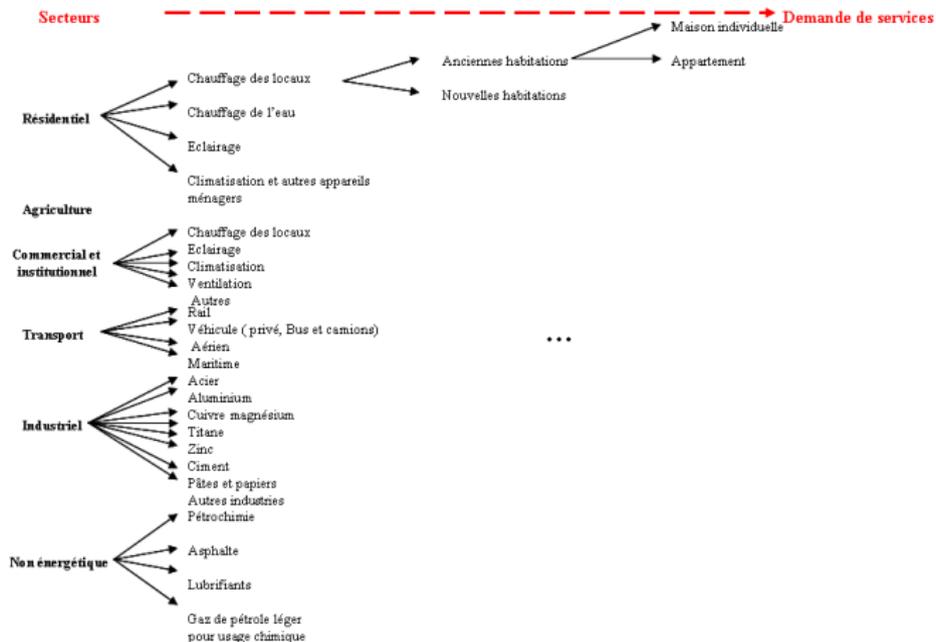


Niveau 2

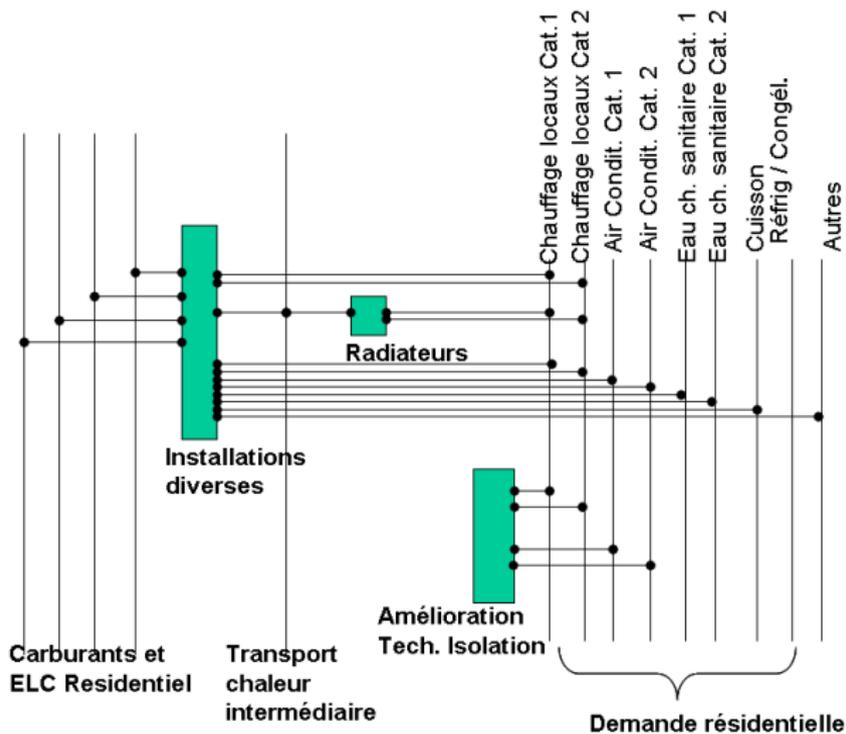


Niveau 3

Une désagrégation sectorielle

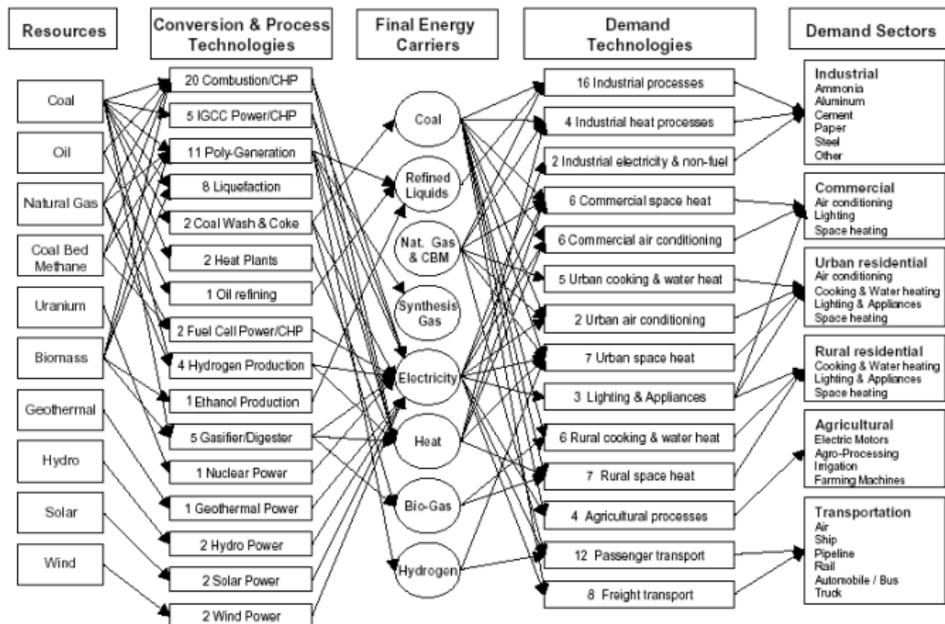


Le RES du résidentiel



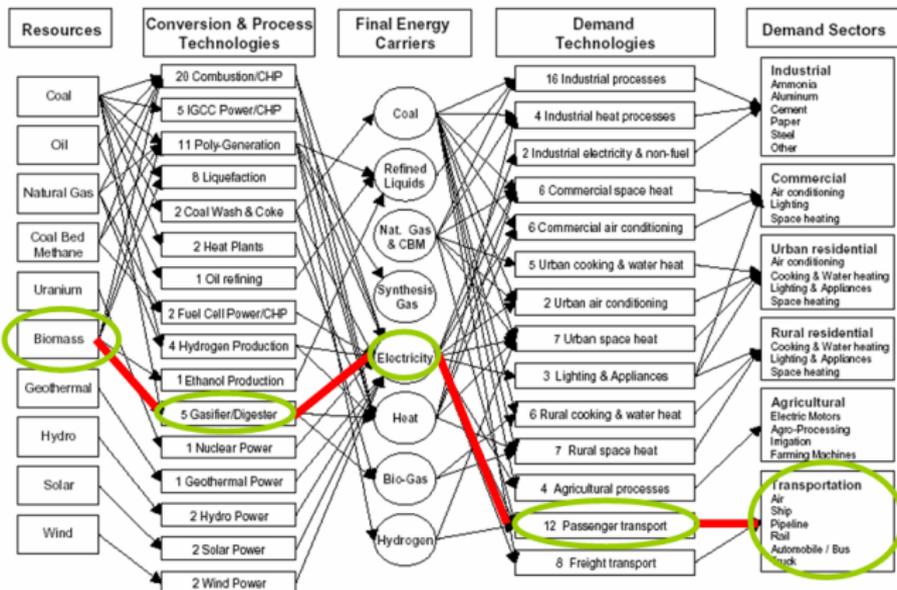
Représentation simplifiée de la structure du modèle MARKAL-Times

Une désagrégation sectorielle et technologique



Représentation simplifiée de la structure du modèle MARKAL-Times

Une désagrégation sectorielle et technologique



La souplesse de MARKAL autorise

à condition de **disposer des données**

- Une désagrégation **technologique** poussée
- Une désagrégation **sectorielle** complète
- Une application à une zone **géographique** quelconque

La souplesse de MARKAL autorise

à condition de **disposer des données**

- Une désagrégation **technologique** poussée
combustible nucléaire fictif input d'une centrale nucléaire versus description précise chaîne d'enrichissement et processus de retraitement
- Une désagrégation **sectorielle** complète
- Une application à une zone **géographique** quelconque

La souplesse de MARKAL autorise

à condition de **disposer des données**

- Une désagrégation **technologique** poussée
- Une désagrégation **sectorielle** complète
une demande d'éclairage sera agrégée ou décomposée : éclairage publique, tertiaire, domestique
- Une application à une zone **géographique** quelconque

La souplesse de MARKAL autorise

à condition de **disposer des données**

- Une désagrégation **technologique** poussée
- Une désagrégation **sectorielle** complète
- Une application à une zone **géographique** quelconque
topologie du RES flexible : secteur électrique en Europe ou demande d'énergie dans les transports pour une région

Les choix décidés via l'optimisation MARKAL-Times

Minimiser le coût total actualisé du système sur l'horizon du modèle

afin de déterminer

les solutions pour chaque technologie, pour chaque période:

- 1 Les niveaux de fonctionnement $C_i(t)$ (capacité); $P_i(t)$ (activité)
- 2 Les niveaux d'investissement $I_i(t)$
- 3 Les coûts associés (réduits, marginaux, ...)
- 4 + éventuellement: émissions, niveaux de taxes, ...

La fonction objectif de MARKAL-Times

Minimiser le coût total actualisé du système sur l'horizon du modèle

en tenant compte des **coûts** suivants

- des coûts d'investissements $invcost_i(t)$
- des coûts d'entretien et de fonctionnement $fixom_i(t)$, $varom_i(t)$
- des importations et des revenus des exportations
- de la valeur de rachat des équipements encore existant à la fin de l'horizon

la fonction objectif: formulation mathématique

Discounted per
period

Discounted per year

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in T} \frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \sum_{i \in TCH} \text{invcost}_i(t) \cdot I_i(t) + \sum_{i \in T} \frac{1}{(1 + \alpha)^{n(t-1)}} \left(\sum_{m=1}^n (1 + \alpha)^{1-m} \right) \times \\
 & \left(\sum_{i \in TCH} \text{fixom}_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_{i \in PRC} \text{varom}_i(t) \cdot P_i(t) \right) \\
 & + \sum_{i \in ELA} \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} \text{varom}_i(t) \cdot P_{izy}(t) + \sum_{i \in HPL} \sum_{z \in Z} \text{varom}_i(t) \cdot P_{iz}(t) \\
 & + \sum_{k \in ENC} \sum_s \text{cost}_{ks}(t) \cdot \text{IMP}_{ks}(t) + \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} \text{cost}_{ELC,s}(t) \cdot \text{IMPELC}_{szy}(t) \\
 & - \sum_{k \in ENC} \sum_s \text{price}_{ks}(t) \cdot \text{EXP}_{ks}(t) - \sum_s \sum_{z \in Z} \sum_{y \in Y} \text{price}_{ELC,s}(t) \cdot \text{EXPELC}_{szy}(t)
 \end{aligned}$$

Avec:

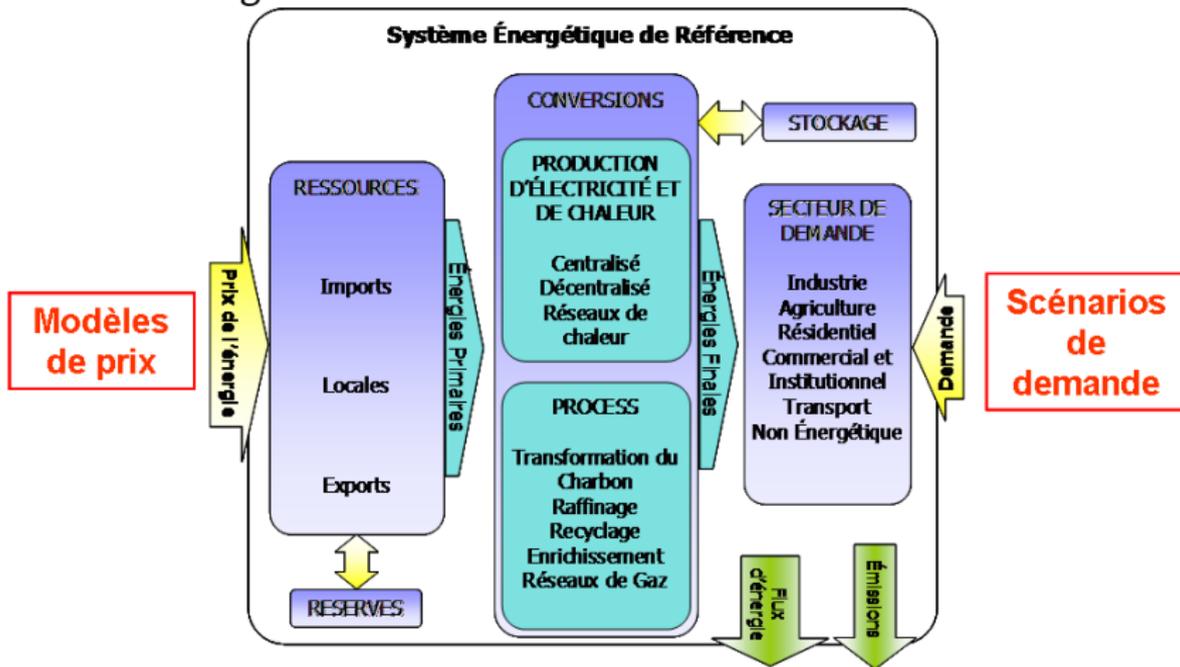
- α : taux d'actualisation annuel,
- n : nombre d'années dans une période,
- $invcost_i(t)$: coût d'investissement unitaire dans la technologie i à la période t ,
- $fixom_i(t)$: coût fixe annuel unitaire d'opération et maintenance de la technologie i pendant la période t , ce coût est associé à la capacité installée,
- $varom_i(t)$: coût variable annuel unitaire d'opération et maintenance de la technologie i pendant la période t , ce coût est associé à l'utilisation de la centrale
- $cost_{ks}(t)$: coût unitaire de vecteur énergétique k en provenance de la source s à la période t ,
- $price_{ks}(t)$: prix unitaire du vecteur énergétique k à destination de s à la période t ,
- $cost_{ELC,s}(t)$: identique à $cost_{ks}(t)$ pour l'électricité
- $price_{ELC,s}(t)$: identique à $price_{ks}(t)$ pour l'électricité

- T: indice de l'ensemble des périodes temporelles,
- TCH: Classe des technologies,
- DMD: Classe des technologies de Demande ($DMD \subset TCH$, exemple: la technologie *voiture* DMD1 consomme de l'essence pour répondre à une demande de transport de x km.passagers/an, la technologie *lampe* DMD2 consomme de l'électricité pour répondre à une demande d'éclairage,...)
- ENC: Classe des vecteurs énergétiques, autres que l'électricité et la chaleur,
- $P_i(t)$: Activité de la technologie i à la période t exprimée en unité énergétique,

- $C_i(t)$: Capacité de la technologie i à la période t ,
- $IMP_{ks}(t)$: Importation du vecteur énergétique k depuis la source s à la période t (exemple: importation de gaz naturel depuis l'Algérie en 2010),
- $EXP_{ks}(t)$: Exportation du vecteur énergétique k depuis la source s à la période t ,
- $out_{ki}(t)$: Production du vecteur énergétique k par unité d'activité de la technologie i (par unité de capacité si technologie de demande) à la période t ,
- $inp_{ki}(t)$: Consommation du vecteur énergétique k par unité d'activité de la technologie i (par unité de capacité si technologie de demande) à la période t ,
- $cf_i(t)$: facteur d'utilisation moyen de la technologie de demande i à la période t

Les contraintes dans MARKAL-Times

Les éléments exogènes



Les contraintes dans MARKAL

Un modèle piloté par la demande

- La **demande** est exogène, elle doit être satisfaite

$$\sum_{i \in \underline{\text{DMD}}} C_i(t) + \sum_{\substack{i \in \text{DMD} \\ i \notin \underline{\text{DMD}}}} \text{out}_{ik}(t) \cdot C_i(t) \geq \text{demand}_k(t), \quad \forall k \in \text{DM}, \forall t$$

- Lors de la résolution, MARKAL détermine le jeu de technologies susceptibles de répondre à cette demande à **moindres frais**
- pas d'équilibre offre/demande résultant en formation de prix : MARKAL détermine des **coûts**.

Les autres contraintes

Contraintes techniques

1 Équilibre des flux énergétiques

pour chaque vecteur énergétique, les quantités entrantes (production au sens large: importations, outputs d'une technologie, ...) sont au moins égales aux quantités sortantes (consommation au sens large: exportations, inputs d'une technologie) et ceci pour chaque période temporelle. $\forall k \in \text{ENC}, \forall t \in T$

$$\sum_{\substack{i \in \text{TCH} \\ i \notin \text{DMD}}} \text{out}_{ki}(t) \cdot P_i(t) + \sum_{i \in \text{DMD}} \text{out}_{ki} \cdot \text{cf}_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_s \text{IMP}_{ks}(t) \\ \geq \sum_{\substack{i \in \text{TCH} \\ i \notin \text{DMD}}} \text{inp}_{ki}(t) \cdot P_i(t) + \sum_{i \in \text{DMD}} \text{inp}_{ki} \cdot \text{cf}_i(t) \cdot C_i(t) + \sum_s \text{EXP}_{ks}(t)$$

2 Accumulation des capacités inter période

3 Limites de fonctionnement

Les autres contraintes

Contraintes techniques

1 Équilibre des flux énergétiques

2 Accumulation des capacités inter période

Cette équation permet de faire le lien entre les capacités résiduelles (une donnée du modèle) à la période t , les nouveaux investissements ayant eu lieu jusqu'à cette période t et la capacité installée d'une technologie à cette période.

$$C_i(t) = \sum_{m=t_0}^t I_i(m) + \text{resid}_i(t) \quad \forall t \in T$$

3 Limites de fonctionnement

4 Réserve d'électricité de pointe

Les autres contraintes

Contraintes techniques

- 1 **Équilibre des flux énergétiques**
- 2 **Accumulation des capacités inter période**
- 3 **Limites de fonctionnement**

l'activité d'une technologie à chaque période temporelle est inférieure à ce que peut effectivement produire la capacité installée; par exemple une centrale de 1 GW fonctionnant au maximum 7000 h par an ne doit pas produire plus de 7 TWh par an

- 4 Réserve d'électricité de pointe

Les autres contraintes

Contraintes techniques

- 1 **Équilibre des flux énergétiques**
- 2 **Accumulation des capacités inter période**
- 3 **Limites de fonctionnement**
- 4 **Réserve d'électricité de pointe**

Cette contrainte permet d'assurer qu'une réserve de capacité est disponible durant la période de plus forte de demande.

Les autres contraintes

Contraintes techniques

- 1 Équilibre des flux énergétiques
- 2 Accumulation des capacités inter période
- 3 Limites de fonctionnement
- 4 Réserve d'électricité de pointe

Contraintes additionnelles (fixées par l'utilisateur)

- 1 Limite d'émissions, ...

Les autres contraintes

Contraintes techniques

- 1 Équilibre des flux énergétiques
- 2 Accumulation des capacités inter période
- 3 Limites de fonctionnement
- 4 Réserve d'électricité de pointe

Contraintes additionnelles (fixées par l'utilisateur)

- 1 Limite d'émissions, ...

La dynamique temporelle de MARKAL

Un horizon = le temps de la prospective

- Modèle statique
- Horizon du modèle: en pratique 20 à 50 ans
- Décomposé en périodes (exemple 5 ans)
- Connaissance parfaite du futur

Quelques remarques sur les données pour MARKAL

Les impératifs

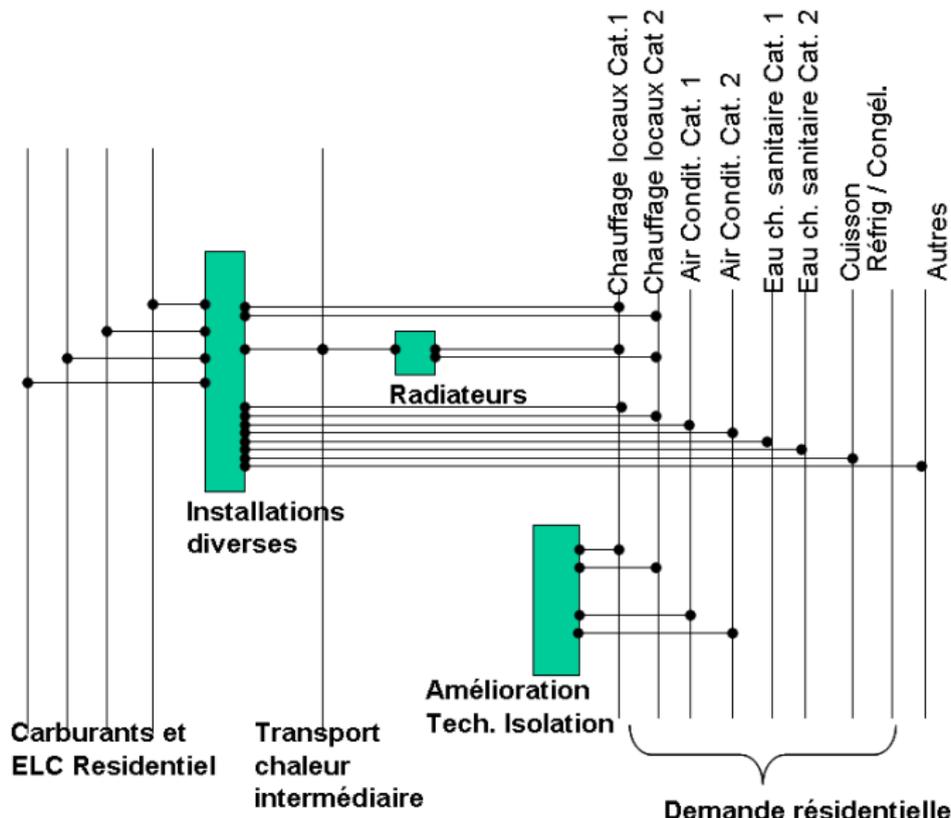
- 1 **Répertorier** l'ensemble des Technologies (existantes et futures)
- 2 **Structurer** le système énergétique de référence (RES)
- 3 **Calibrer** pour l'année de départ

Répertorier l'ensemble des Technologies (existantes et futures)

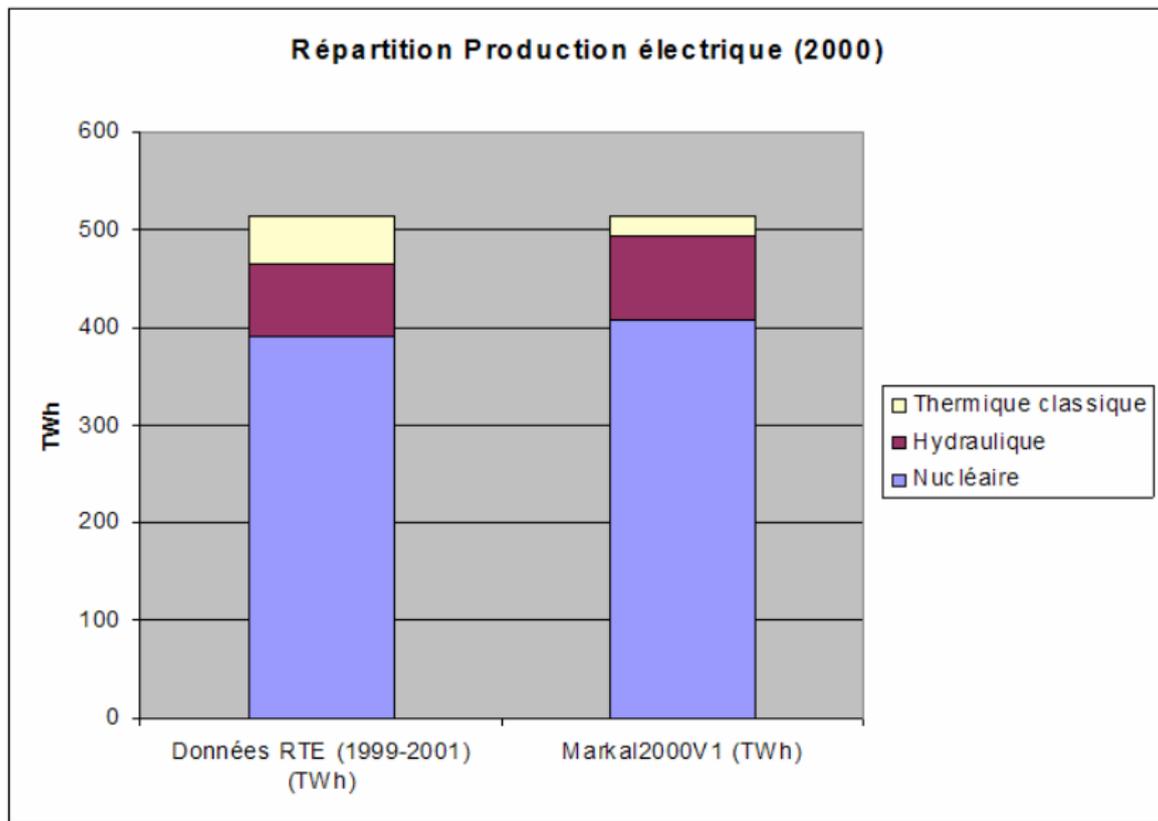
Maison individuelle habitat urbain ancien, Eau chaude sanitaire

CARBURANTS	description	Pertinence pour le modèle: OUI/NON	
		PAYS1	PAYS2
REGAS	Chaudière gaz (ballon)	OUI	OUI
RESLPG	Chaudière GPL (ballon)	NON	OUI
RESOIL	Chaudière pétrole(kérosène,fioul,gasoil)	NON	OUI
RESCOA	Chaudière charbon	NON	NON
RESSOL	Chaudière solaire; appoint électricité	OUI	OUI
	Chaudière solaire; appoint gaz	NON	OUI
RESGEO	Échangeur de chaleur	NON	NON
RESELC	Cumulus électrique	OUI	OUI
	Pompe à chaleur (électrique)	OUI	OUI

Structurer le système énergétique de référence (RES)



Calibrer pour l'année de départ



Synthèse des principes fondateurs de von Neumann-Sraffa

Les ingrédients de von Neumann et Sraffa

le formalisme de l'analyse d'activité décrit des processus "qui consomment" ou "produisent" des biens :

"A model of general equilibrium" von Neumann (1937) révolutionne l'économie mathématique en introduisant

- 1 un modèle de croissance à **horizon infini**
- 2 un schéma descriptif basé sur une **représentation atomistique** de la production via l'analyse d'activités : tout ce qui est consommé doit avoir été produit (généralisation de la forme carrée de Léontieff)
- 3 la preuve de l'**existence d'équilibre** utilise des techniques mathématiques paradigmatiques de l'optimisation : topologie, dualité, point selle, minimax, ...

MARKAL-Times et les modèles bottom-up dits "ingénieur" dérivent de cette approche.

Quelques enseignements des exercices de prospective

Dans l'attitude prospective . . . ce que les faits annoncent est plus important que ce qu'ils expliquent. François Bloch-Lainé



Les scénarios du rapport Besson



Du glissement de la question prospective

... pour alimenter la préparation de la PPI 2013

le rapport devait fournir une analyse du mix énergétique à l'horizon 2050

- la croissance mondiale de la demande en énergie
- l'utilisation des ressources fossiles non-conventionnelles
- l'accident de Fukushima et ses conséquences sur le domaine nucléaire (avec notamment les décisions allemande et suisse de sortir du nucléaire ou italienne de ne pas relancer cette filière)
- l'objectif de 23 % d'énergies renouvelables dans notre consommation finale d'énergie en 2020

le travail s'est concentré sur le mix électrique et on retiendra une vision équilibrée des conclusions du rapport (telle que largement diffusée dans la presse)

☞ Extension de la durée de vie des centrales à 60 ans

scénarios préexistants ou exploiter le flux



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Pertinence de l'exploitation des scénarios existants

Storytelling

Faire rêver, Effrayer

- Négawatt
- Global Chance
- Négatep (Sauvons le Climat)

Back-casting

Définir des objectifs; Identifier les étapes intermédiaires; Comparaison économique

- CEA
- AREVA
- UFE

Modélisation

Demande et Offre

- Enerdata
- RTE

Du danger de la comparaison de scénarios incomparables

Organisation	Horizon	Nucléaire	Fossile	Renouvelables	Durée de vie
CEA	2025	74 %	2 %	24 %	
Areva	2050	70 %	10 %	20 %	58 ans
Areva	2050	70 %	10 %	20 %	40 ans
UFE	2030	69 %	7 %	24 %	60 ans
Areva	2050	50 %	20 %	30 %	
UFE	2030	50 %	16 %	34 %	
UFE	2030	20 %	40 %	40 %	40 ans
Areva	2050	0 %	30 %	70 %	40 ans
CEA	2025	0 %	16 %	84 %	
Areva	2050	0 %	70 %	30 %	40 ans
CEA	2025	0 %	87 %	13 %	

Différences entre les scénarios de back-casting

scénarios dédiés ou exploiter le flux



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Comment élaborer la réflexion sur des scénarios dédiés

- envisager 2050 en s'intéressant tout particulièrement à la part du nucléaire dans le mix électrique en considérant quatre possibilités :
 - L'extension de la durée de vie des réacteurs actuels ;
 - La transition accélérée vers la 3ème ou la 4ème génération ;
 - La réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité ;
 - La sortie du nucléaire

Exercices de prospective pour la France Commission Besson

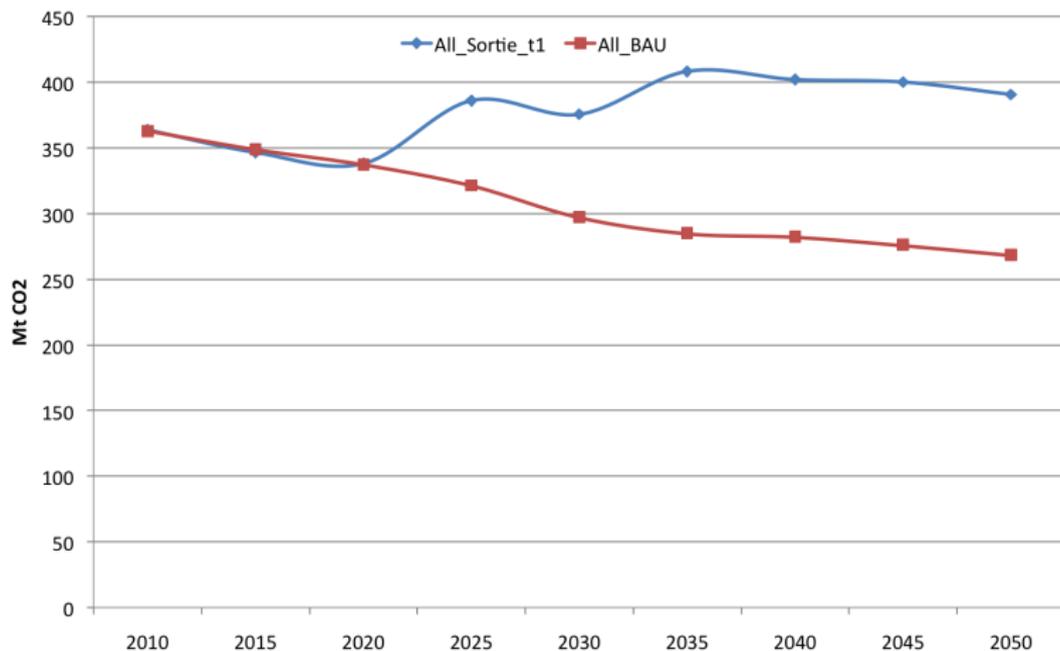
Scenarios envisagés	Contraintes CO ₂	Demande élastique	Statut Nucléaire	Hypothèses communes
BAU	(20 euros/T) taxe ETS	référence	Maintien 65GW	Prix WEO 2010 %
PROGt1	taxe ETS	oui	Sortie Progressive	Demande RTE référence
PROGv1	taxe ETS + émissions BAU	oui	Sortie Progressive	
FASTt1	taxe ETS	oui	Sortie Rapide (40 ans)	Exportations variables
FASTv1	taxe ETS + émissions BAU	oui	Sortie Rapide (40 ans)	

positionnement préalable tous secteurs



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Effet d'une taxe sur le scénario volontariste

Figure: Emissions de CO₂ BAU et scénario FAST

Analyse de la consommation primaire par scénario

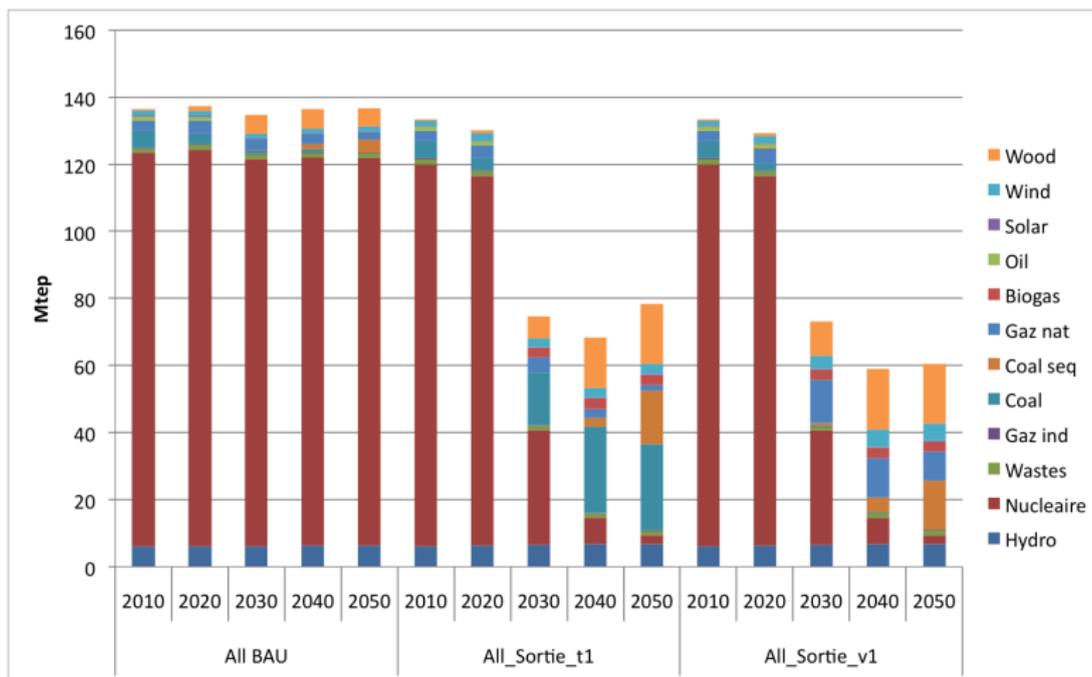


Figure: Energie primaire

Analyse de la consommation finale par type d'énergie

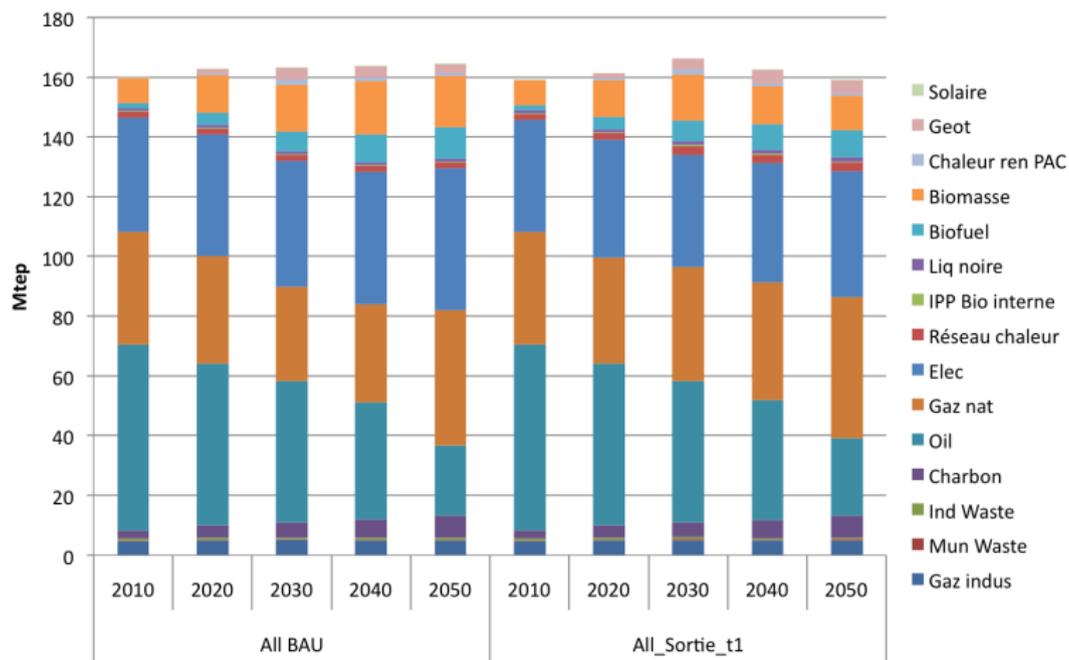


Figure: Consommation finale par énergie

mix de production électrique: analyse prospective des résultats



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

Une faible taxe donne la part belle au charbon

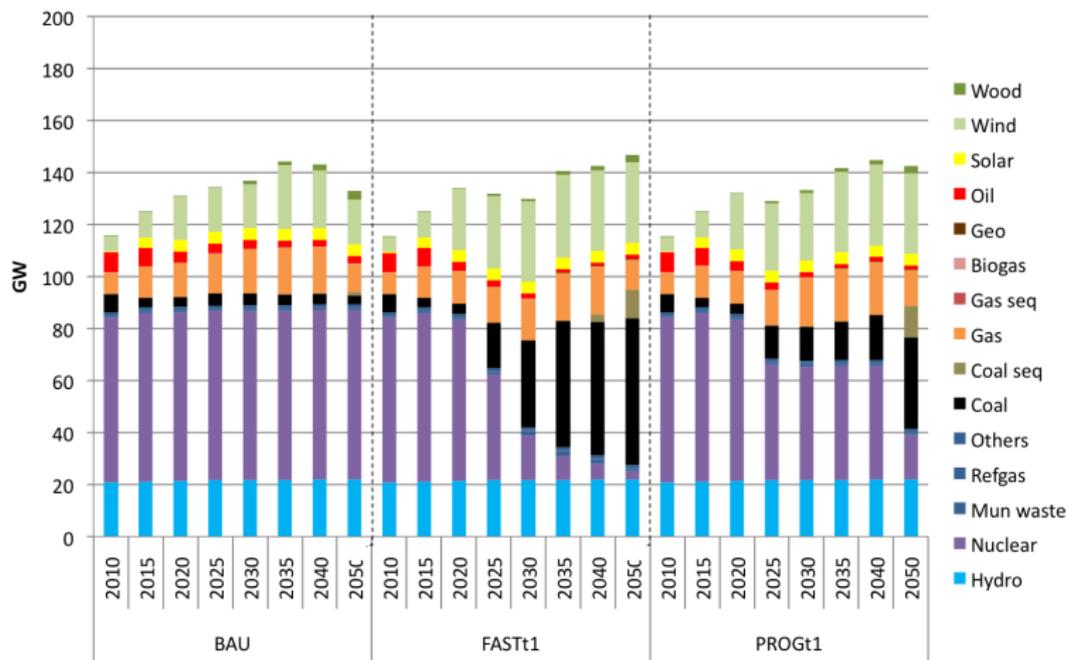


Figure: Capacités (contrainte par la taxe)

Sensibilité du mix de production : taxe ETS seule

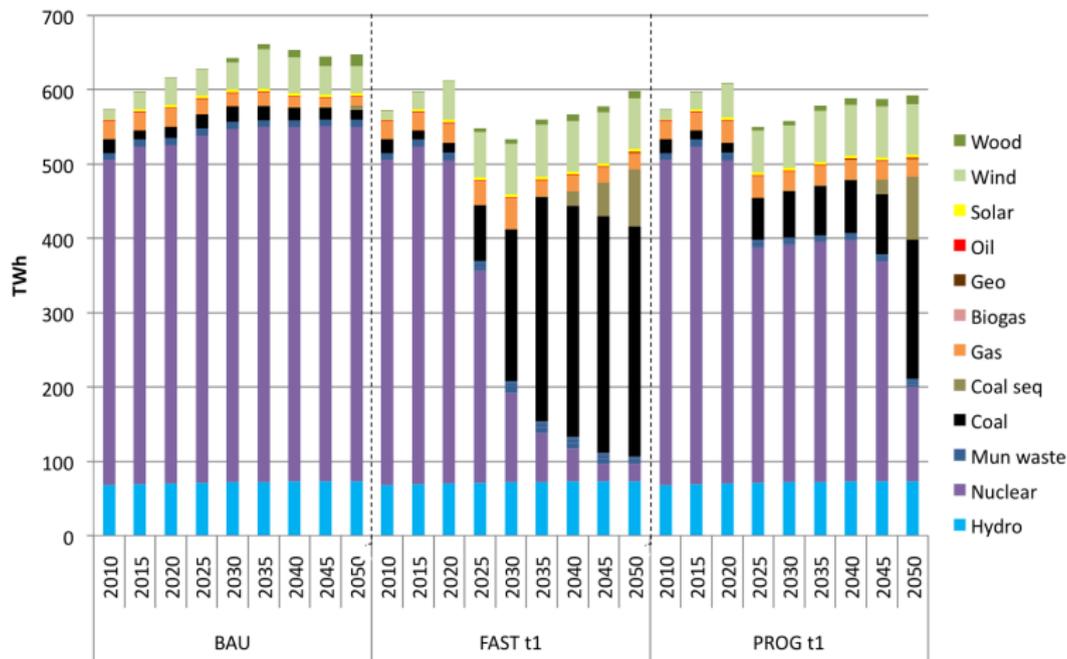
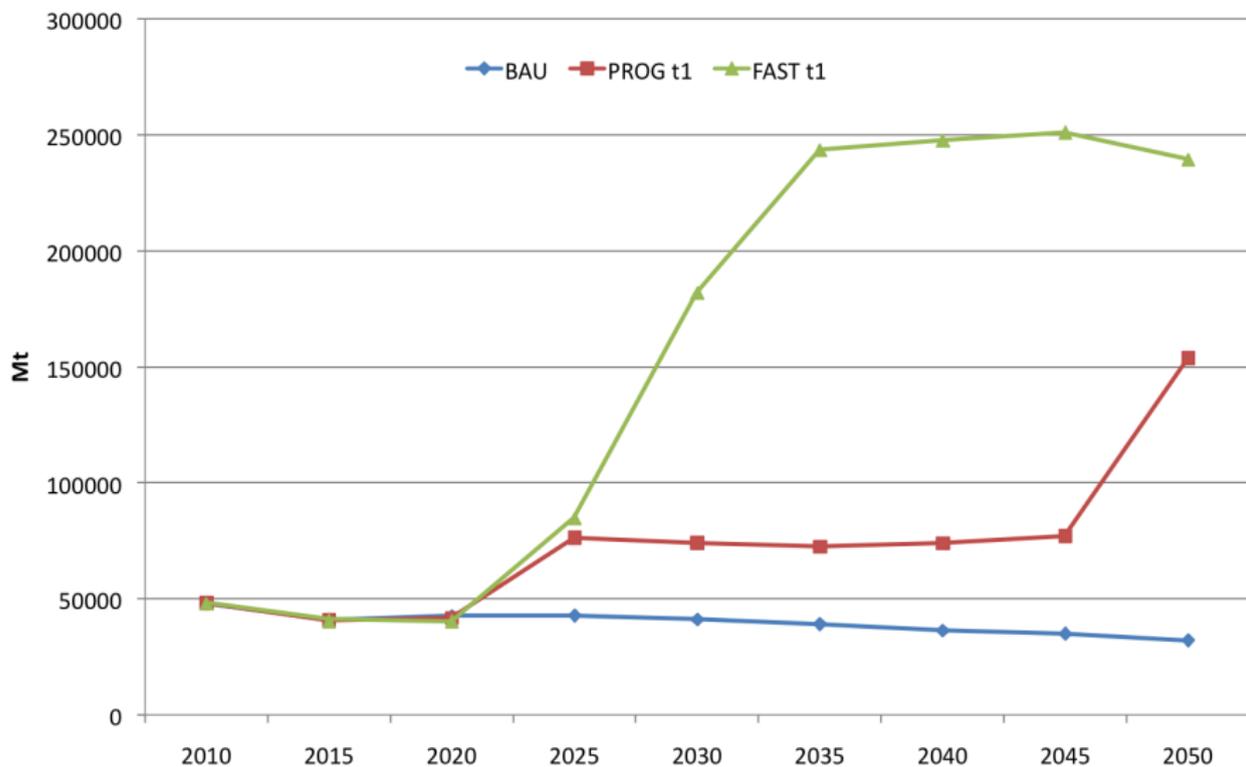


Figure: Production électrique (contrainte par la taxe)

Contraire en volume de CO₂ émis

Une contrainte en volume favorable aux renouvelables

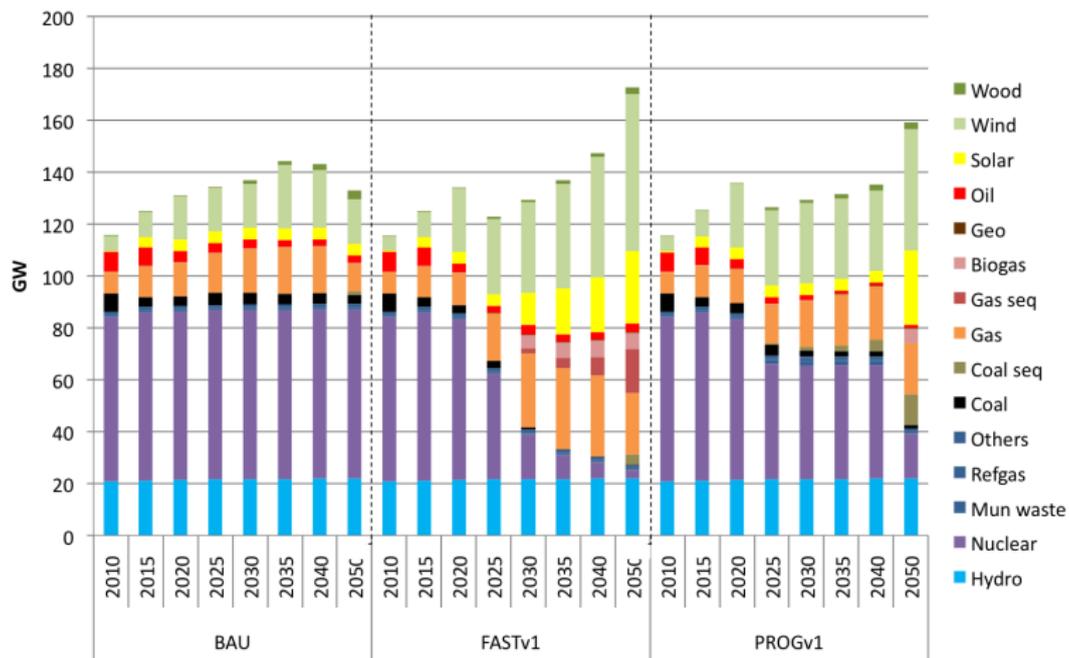


Figure: Capacités (contrainte par la taxe et les quantités)

Sensibilité du mix de production : taxe + quantités

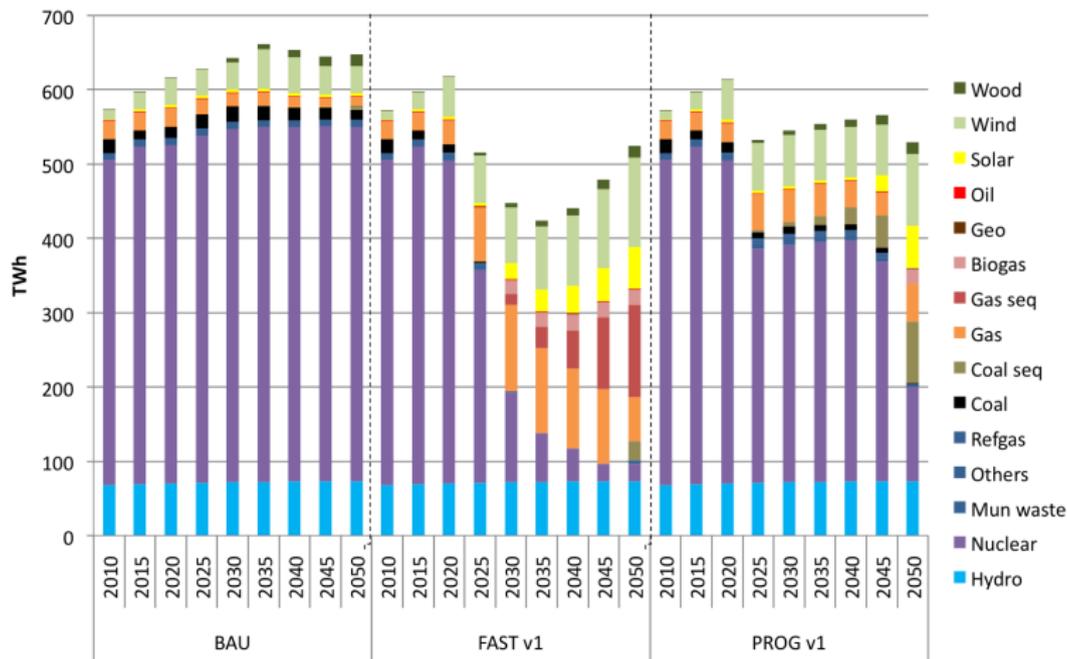


Figure: Production électrique (contrainte par la taxe et les quantités)

Analyse du niveau des exportations: taxe ETS seule

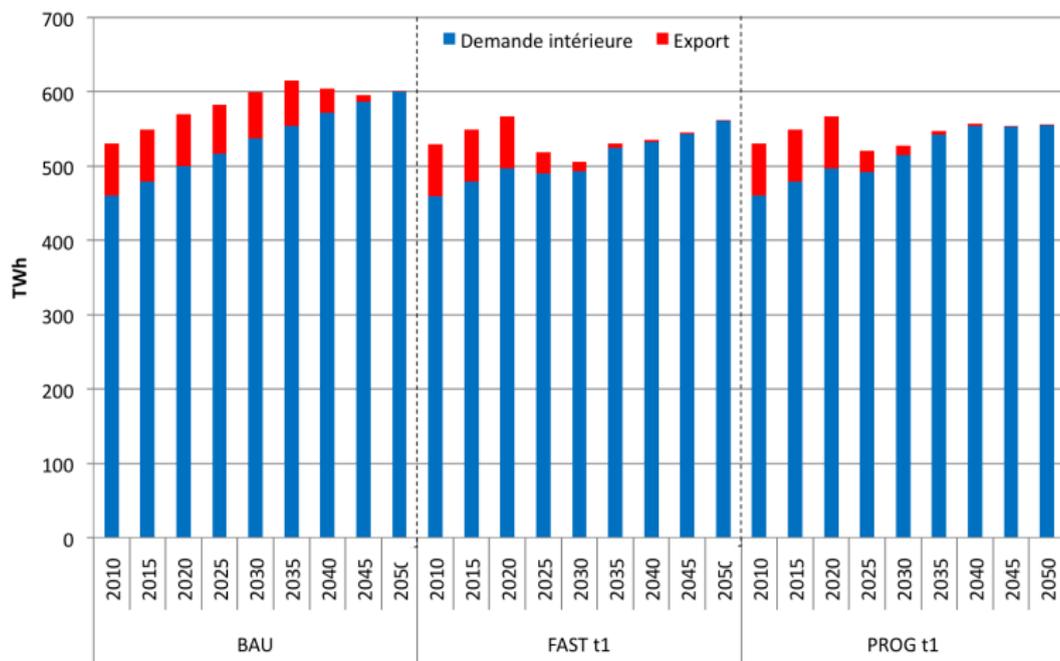


Figure: Exportations/Demande intérieure (contrainte par la taxe)

La France dans l'Europe : quid des exportations ?

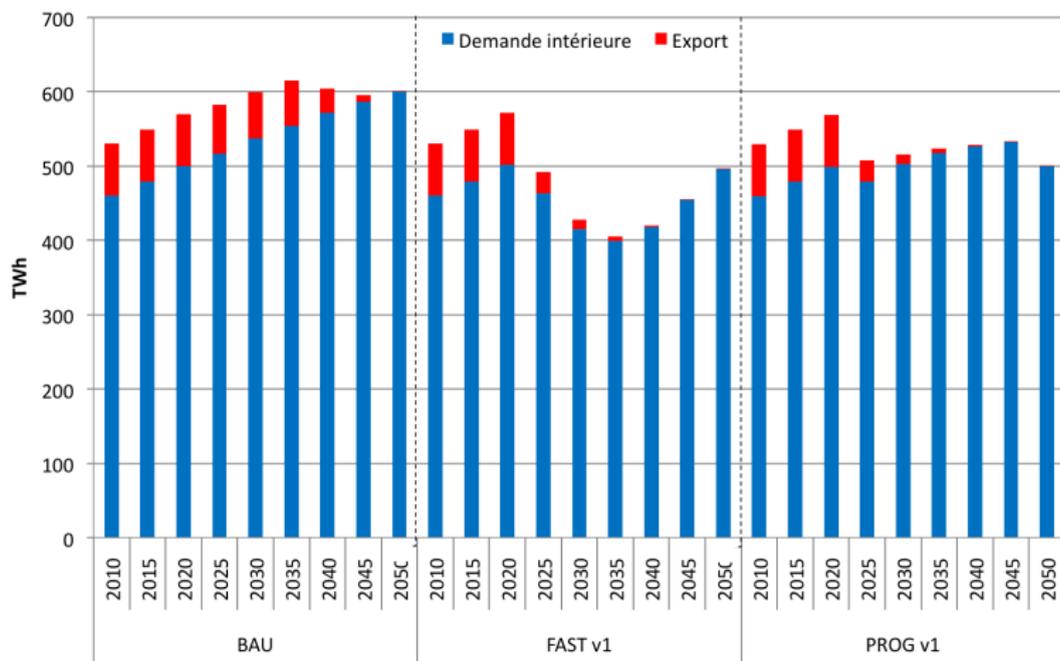


Figure: Exportations/Demande intérieure (contrainte par la taxe et les quantités)

Nouvelles capacités installées (avec les réacteurs prolongés)

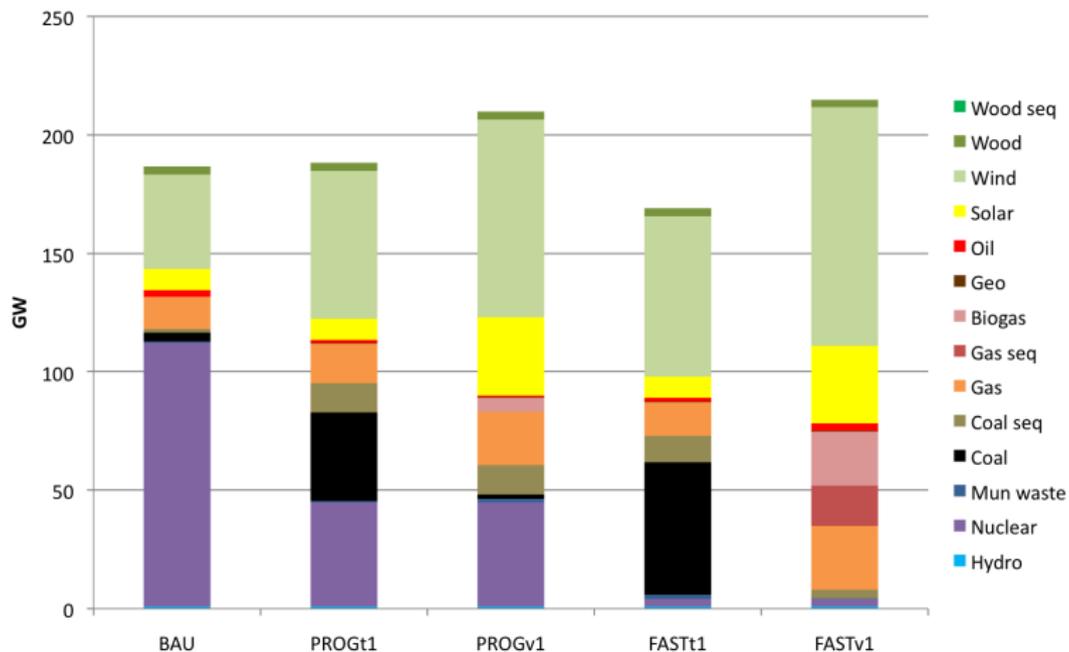


Figure: Nouvelles capacités installées par scénario

Nouvelles capacités installées (sans les réacteurs prolongés)

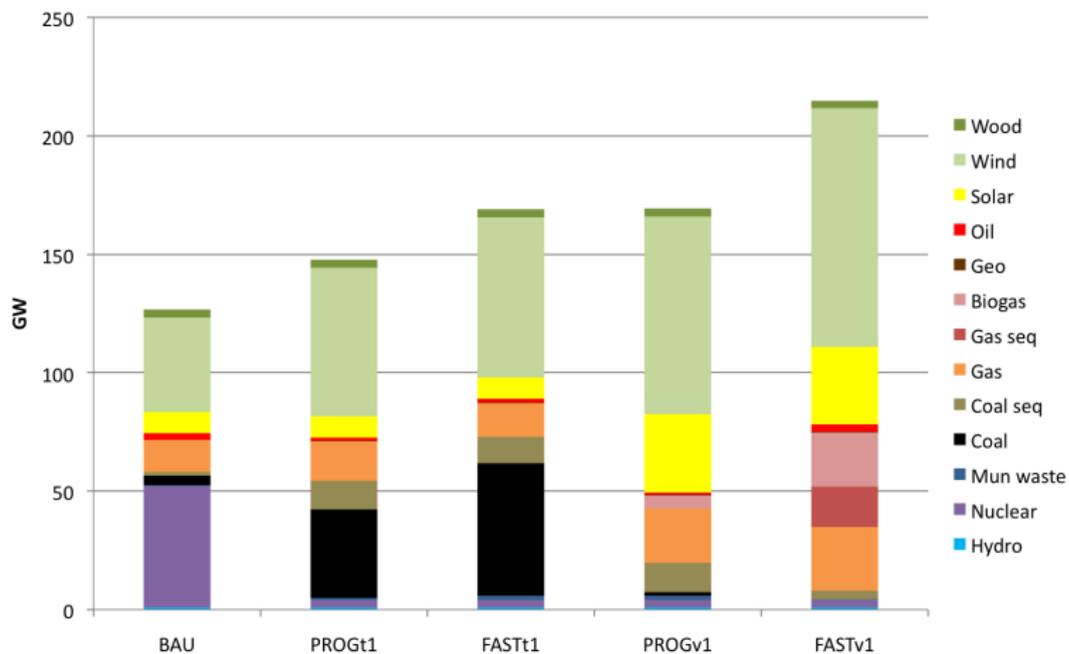


Figure: Nouvelles capacités installées par scénario

Nouvelles capacités installées pour un maintien à 65 GW

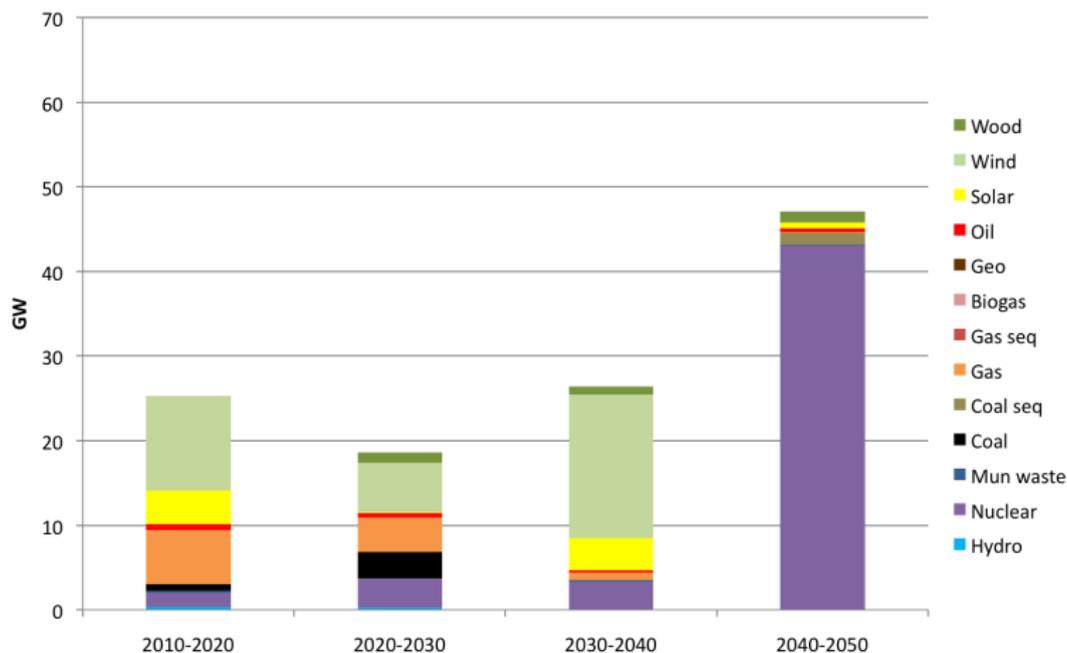


Figure: Nouvelles capacités installées pour le BAU

Plausibilité du rythme de renouvellement des capacités

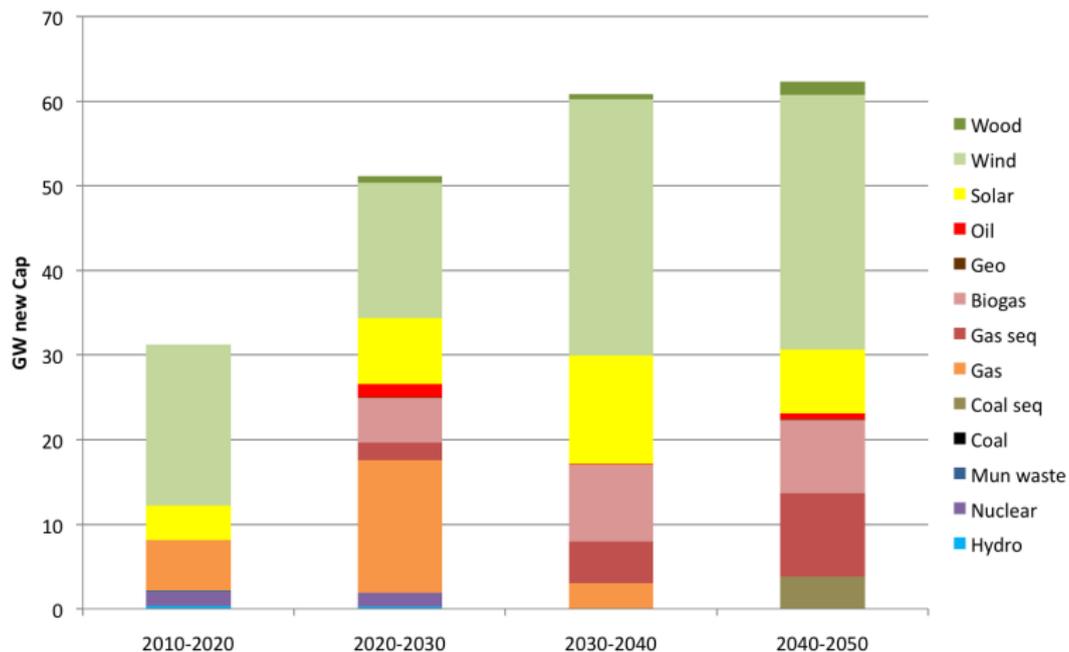


Figure: Nouvelles capacités installées pour FASTv1 (sortie 40 ans, taxe ETS et quantités)

Fonction objectif de TIMES-FR électrique

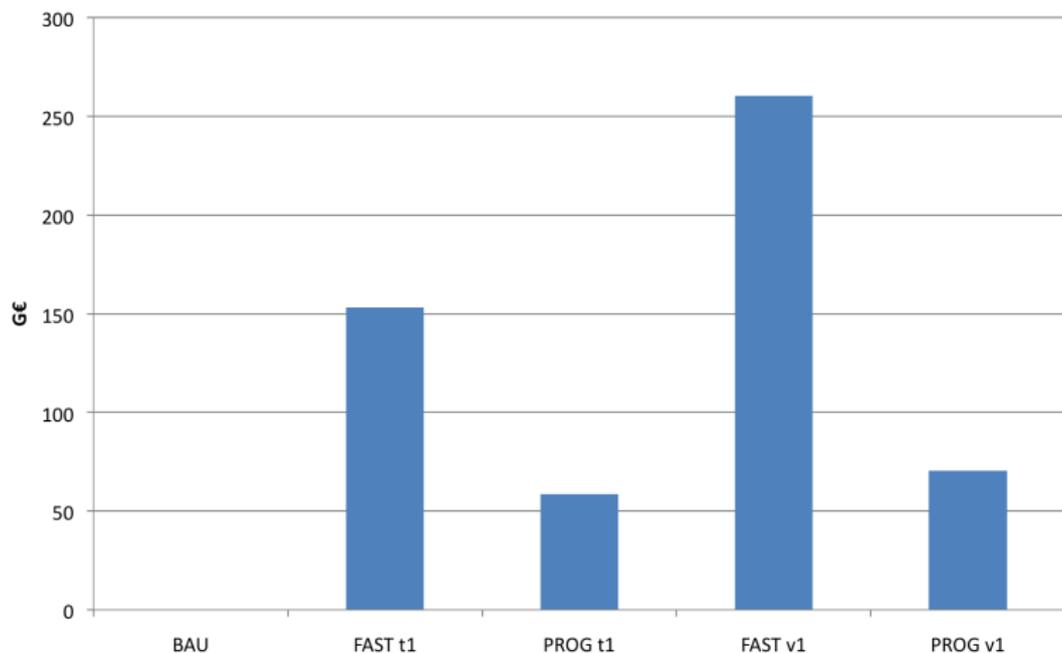
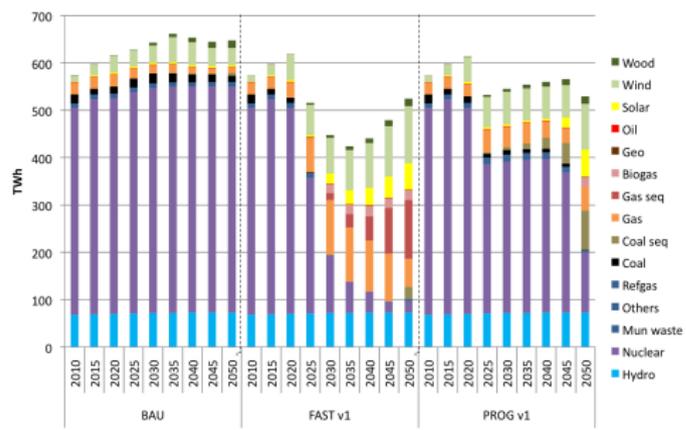


Figure: Surcoût par rapport au Coût total actualisé du BAU (actualisé en 2011)

Question de la fiabilité des systèmes électriques



☞ Quid de la **pertinence** et la **plausibilité** des mix de production électrique évalués via les exercices de prospective long terme

Production électrique taxe et contrainte en volume



Figure: L'Europe pendant le blackout de l'Italie (28 Sept. 2003). Source: RTE.

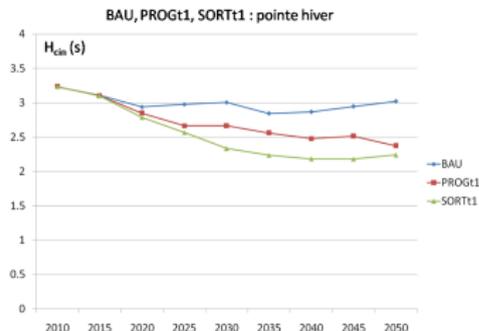
Niveau de fiabilité des scénarios évalués

H_{cin} H_{mag} indicateurs du
niveau de fiabilité Brevet FR 11
61087. 2/12/2011

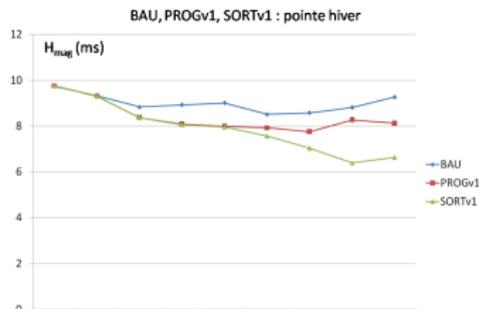
le temps dont on dispose pour rétablir la stabilité du système après une fluctuation de charge (équivalente à la capacité totale du système installé) via le contrôle de ses réserves.

☞ Le système sera d'autant plus fiable que les réserves sont grandes.

Reserves Cinétiques



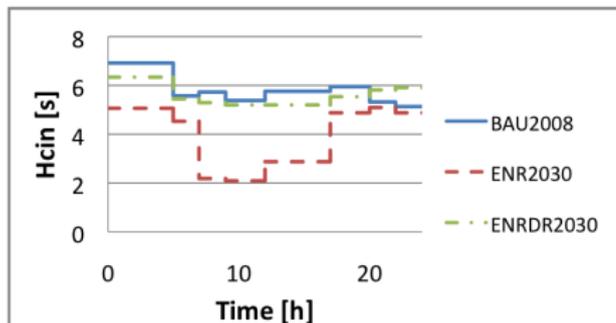
Reserves Magnétiques



Impact de la Demand Response sur la fiabilité

Thèse S. Bouckaert

- La Demand response
 - induit des gains en capacité installée sur le long terme
 - relève les indicateurs de fiabilité



Indicateur de fiabilité pour la réserve cinétique

Cas de la Réunion :

- BAU 2008
- 100 % renouvelable en 2030
- 100 % renouvelable en 2030 + Demand response

analyse tous secteurs : zoom sur le gaz



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

La vision des tendances tous secteurs est biaisée

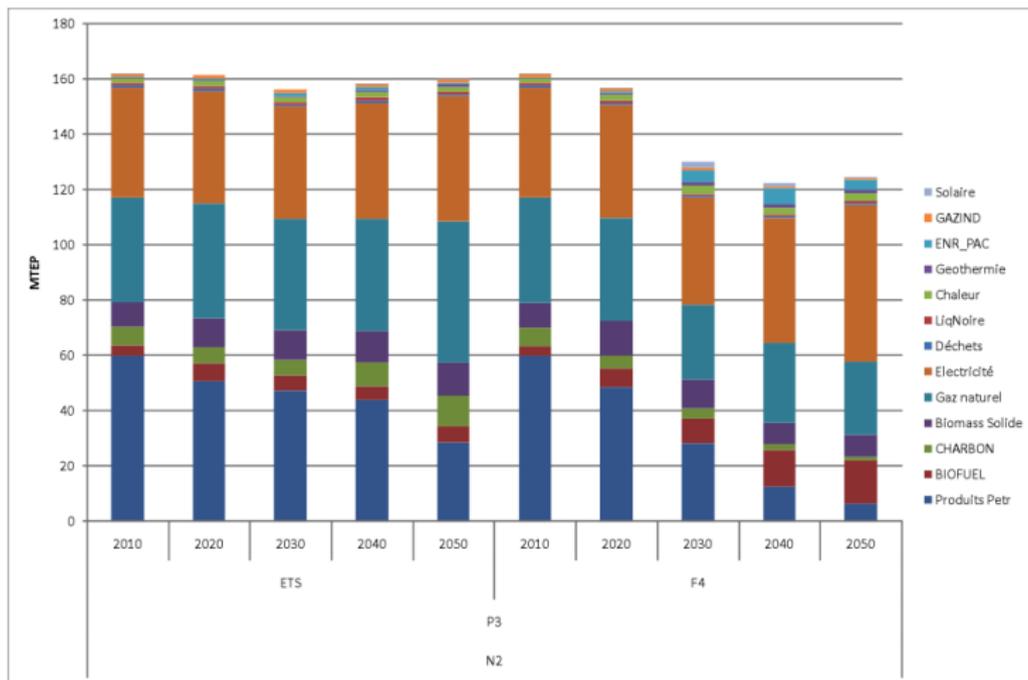


Figure: Evolution de la consommation finale tous secteurs

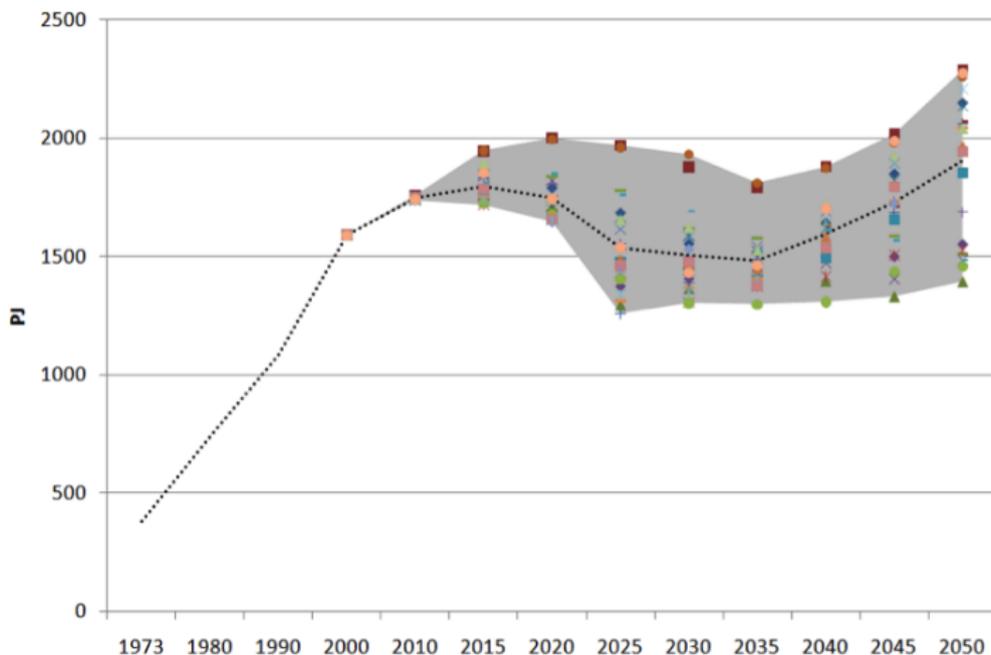
24 scénarios de sensibilité aux : prix⁽³⁾/nucléaire⁽²⁾/émissions⁽⁴⁾

Figure: Evolution de la consommation de gaz naturel tous scénarios

Transition des secteurs d'usage traditionnels du gaz

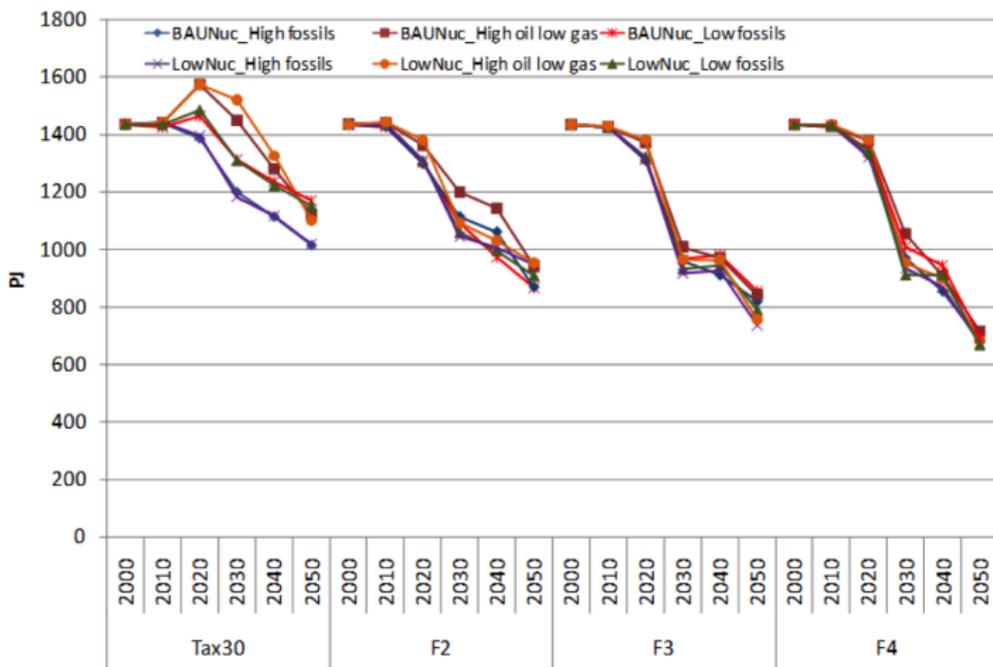


Figure: Evolution de la consommation de gaz : résidentiel et industrie

vers des nouveaux secteurs

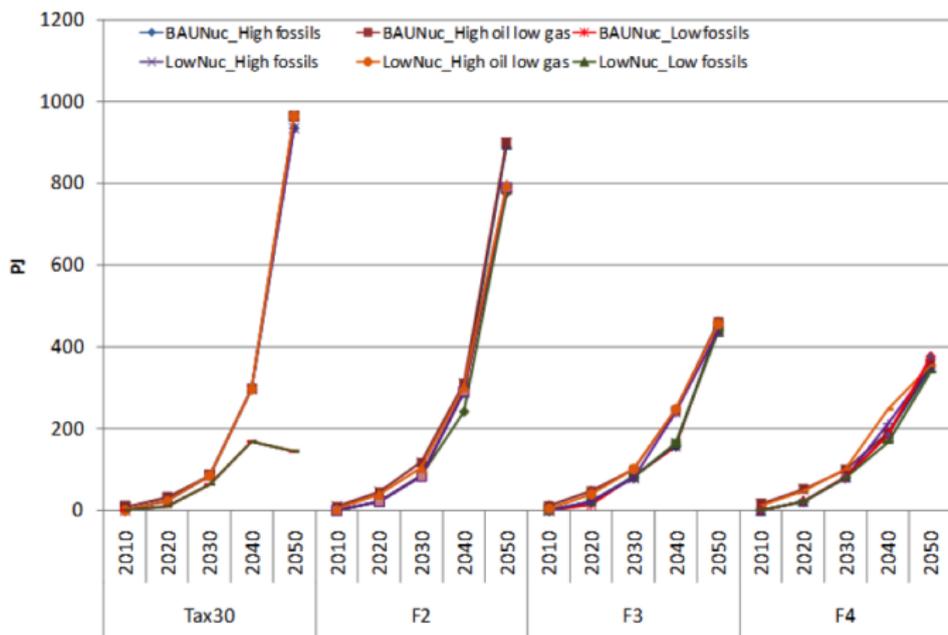


Figure: Evolution de la consommation de gaz : transport

Substitution du gaz dans le secteur de la production d'énergie

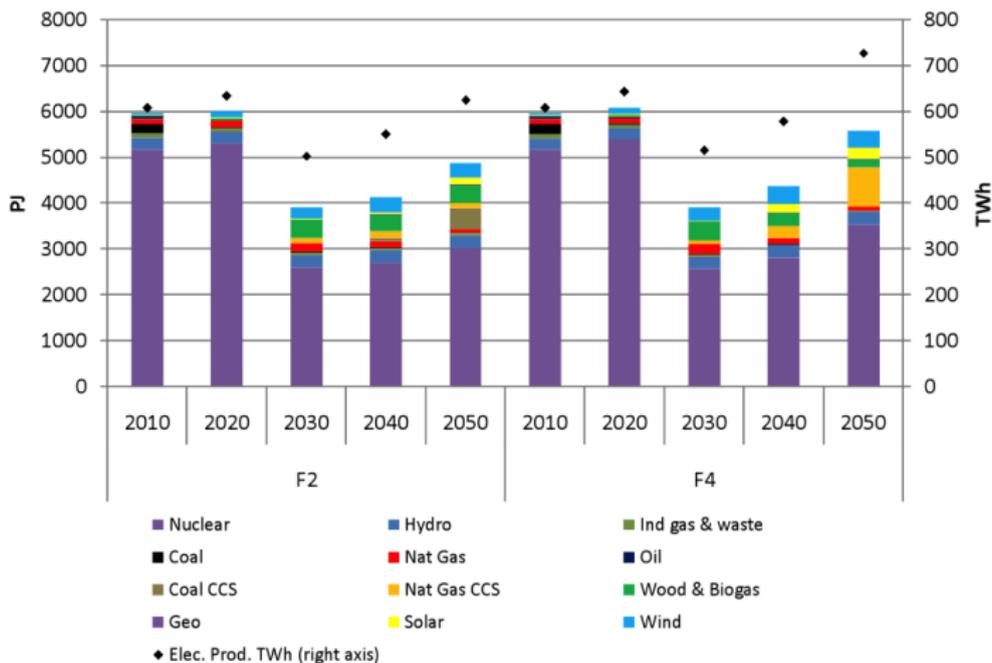


Figure: Entrée de la production d'électricité : ou électricité primaire

Substitution du gaz dans le secteur des transports

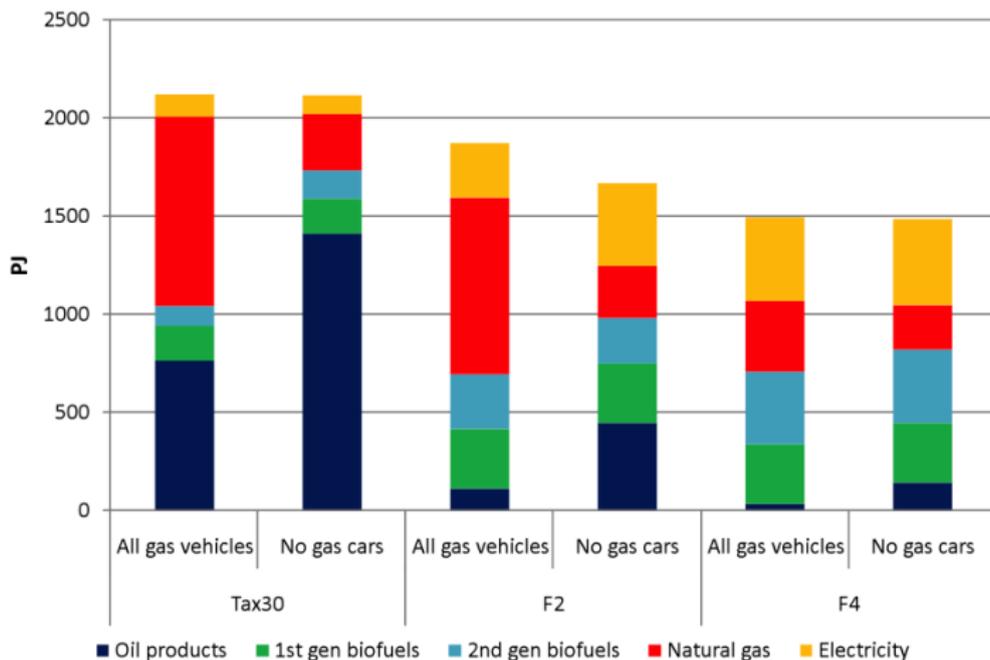


Figure: Mix énergétique du secteur des transports

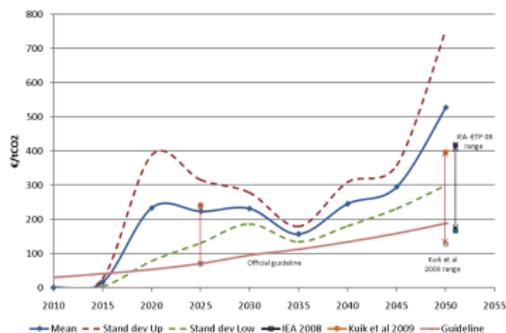
Une transition énergétique intelligente



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

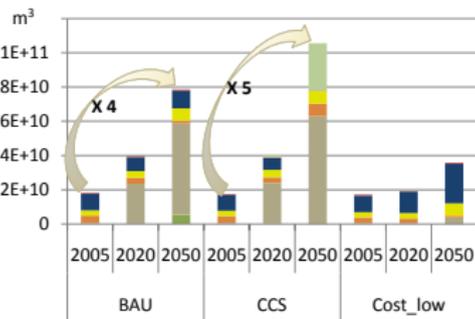
travaille en flux sur des scénarios de long terme

- qui permettent d'évaluer la qualité de service à l'utilisateur
- qui mesurent les coûts marginaux d'abattement
- qui intègrent les externalités
- qui évaluent les compétitions sectorielles



Valeurs du carbone évaluées avec TIMES-FR

Eau douce pour la production électrique mondiale



C'est la condition de l'élaboration d'une transition énergétique intelligente

faute de quoi **TOUTES** les transitions sont envisageables.

Travaillons donc à bien penser, c'est le principe de la politique. Pascal

Contact

nadia.maizi@mines-paristech.fr

Site Web

<http://www.modelisation-prospective.org/>

- Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique, M. Drouineau, Thèse MINES ParisTech (2011)
- Water modeling in an energy optimization framework - The water-scarce middle east context, A. Dubreuil, S. Bouckaert, S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi Applied Energy (2013)
- Smart grids and prospective modeling for the electricity sector. S. Bouckaert, E. Assoumou, N. Maïzi European Conference on Research Operational (2012)
- Analyse critique du rapport Besson, R. Dudouit Thèse professionnelle mastère OSE (2012).
- Analysis of the effect of environmental policies on the allocation of natural gas accross end-use sectors in France, E. Assoumou and N. Maïzi, CMA, MINES ParisTech, Working Paper n° 2011-02-02.



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

ANNEXES



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

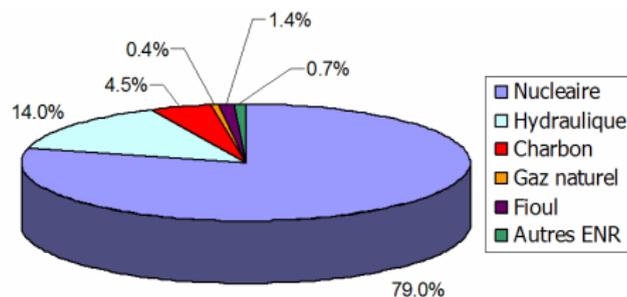
panorama du secteur électrique français



Chaire ParisTech Modélisation prospective
au service du développement durable

La production d'électricité (BP 2011)

Capacités Installées 1/1/2011	Thermiques nucléaire	Thermique EnR	Thermique électrique	Hydro	Eolien	Solaire PV
(GW)	63.1	27.1	1.2	25.2	5.8	0.9

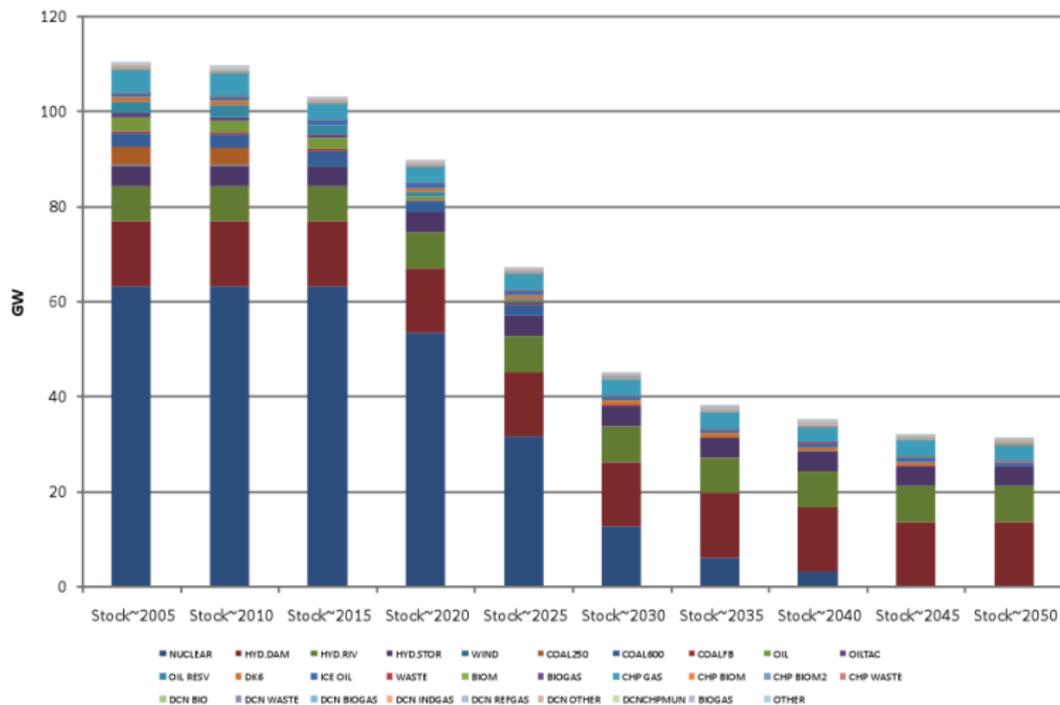


~ 500 TWh : dominée par le **nucléaire** 79 %

25 to 30 TWh : utilisation de **centrales thermiques fossiles** (~ 6%)

Quelle structure pour le futur parc électrique ?

Structure de la capacité résiduelle



Quels exercices de prospective pour l'électricité ?

Analyser les tendances selon

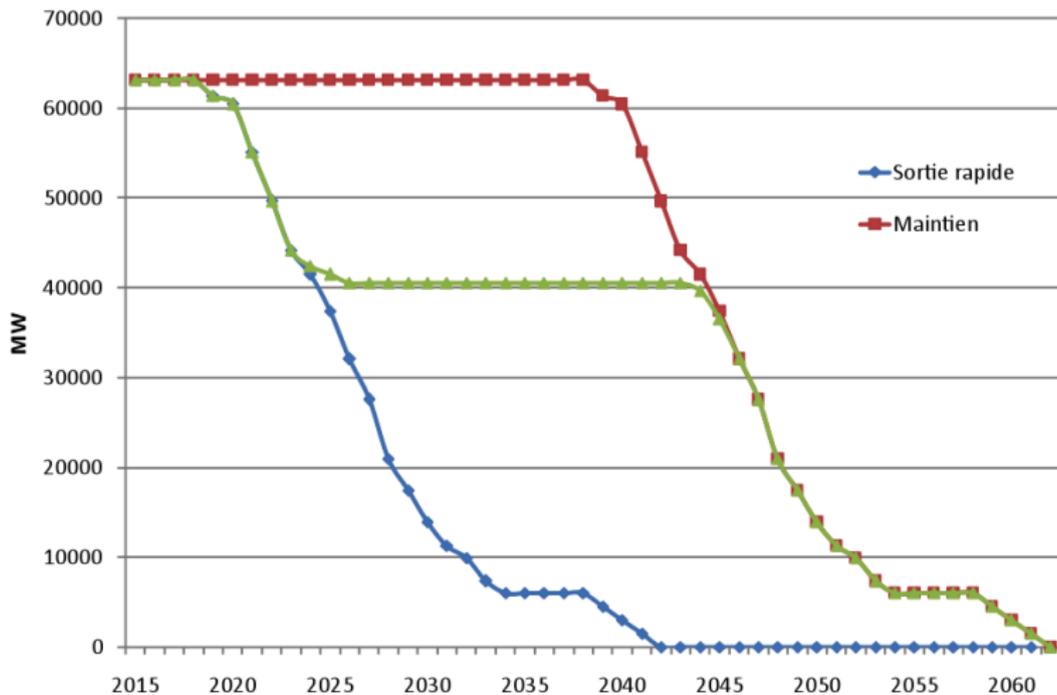
- 1 Les orientations de la politique nucléaire : 3 options
- 2 Evolution des émissions de CO₂
 - contrôle par les prix : taxe
 - contrôle par les quantités : limitation
- 3 Demande élastique référencée sur le scénario de consommation de référence du RTE BP 2011

Capacités de production

Trois scénarios de remplacement des centrales nucléaires

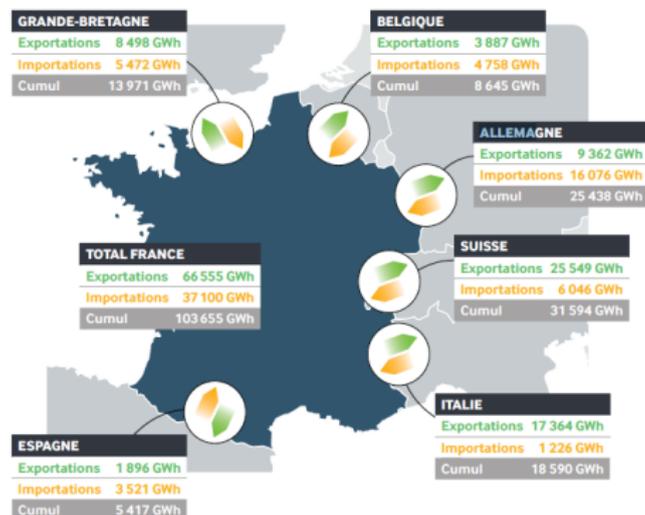
- 1 **Maintien = BAU** de la capacité nucléaire à 65 GW (extension de la durée de vie à 60 ans pour l'existant puis remplacement si nécessaire)
- 2 **Sortie Progressive = PROG**: durée de vie limitée à 40 ans pour un réacteur sur deux; prolongement des autres à 60 ans avec surcoût de 600M€/réacteur
- 3 **Sortie Rapide = FAST**: durée de vie limitée à 40 ans

Scénarios alternatif pour le nucléaire



France en Europe : un réseau interconnecté

Exportations nettes françaises : ~ 70 TWh



Profil des exportations

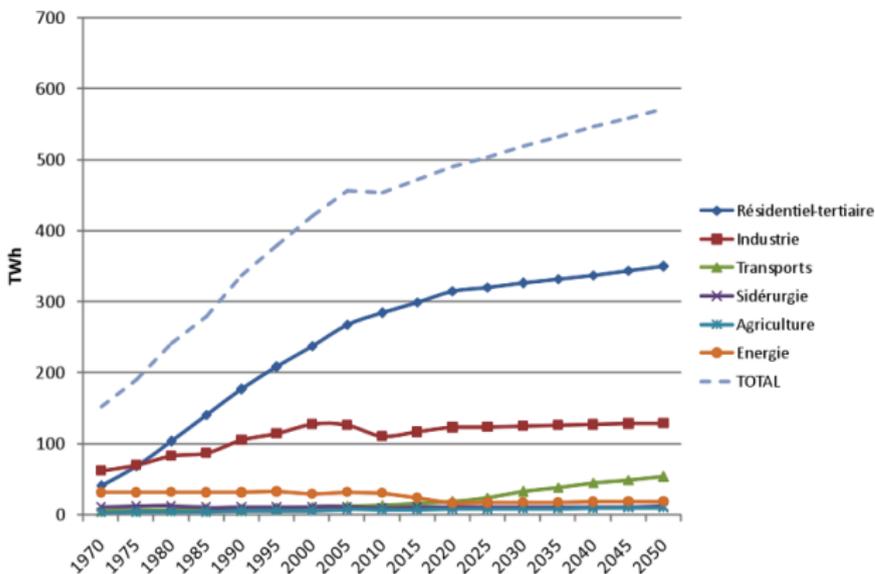
Valorisées pour un tarif variant de 40 à 50 €/kWh

Figure: Echanges contractuels transfrontaliers en 2010 source RTE

Scénarios de demande pour le BAU à l'horizon 2050

Elaboré à partir de la prévision de consommation intérieure électrique de référence corrigée des exportations et pertes

Source: RTE/BP 2011.



Demande élastique

Coût marginal de référence du BAU

(sous contrainte de satisfaction de la demande)

Principe de la demande élastique

plages de variation

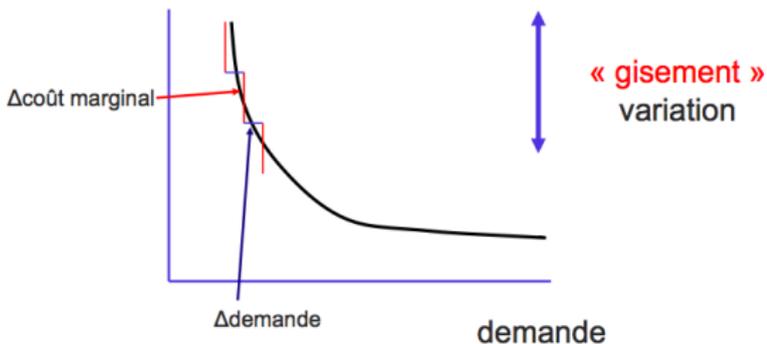
- « gisement » variation demande :

fixer la plage maximum de variation de la demande utile par rapport au référentiel

- coefficient d'élasticité :

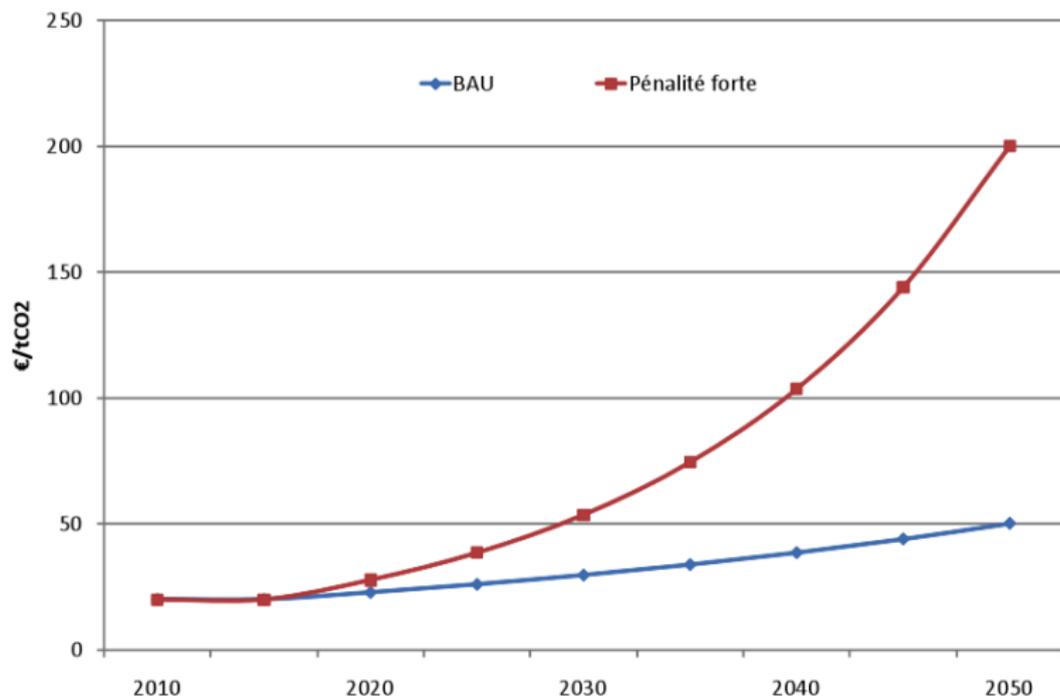
$$\frac{\Delta \text{coût marginal}}{\Delta \text{demande}} = 0.3$$

coût marginal



Taxes CO₂

- 1 taxe ETS = autour de 20€/T
- 2 taxe QUINET = 20€/T à 200€/T

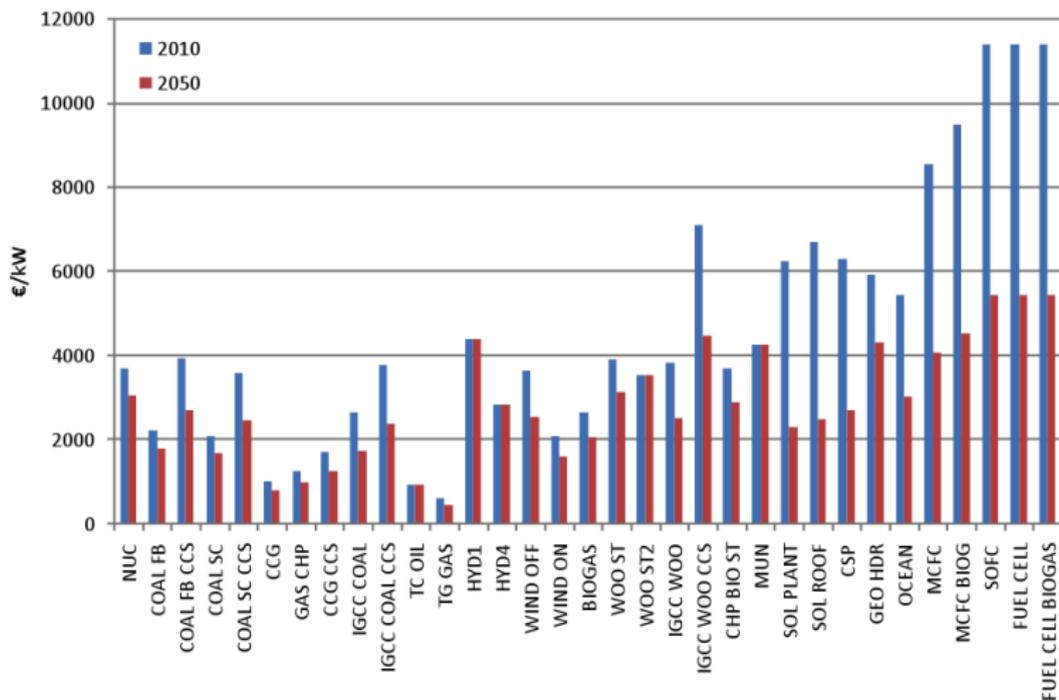


Hypothèses de Prix

Ressources fossiles : hypothèses du WEO 2010

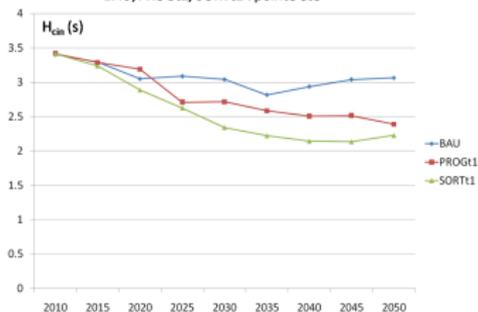
unité		2010	2020	2030	2040	2050
\$/tep	pétrole	60.4	99.0	110.0	117.2	125.2
\$/MBTU	gaz	7.4	11.6	12.9	13.8	14.9
\$/tonne	charbon	97.3	101.7	105.6	107.7	110.0

Coût d'investissement des technologies de production

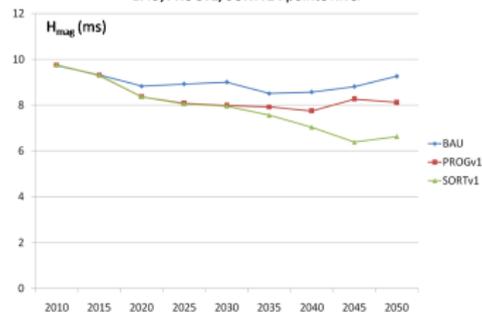


Fiabilité des scénarios évalués

BAU, PROGt1, SORTt1 : pointe été

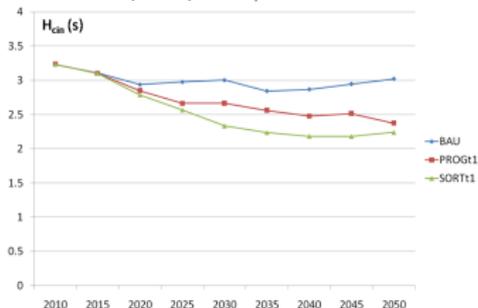


BAU, PROGv1, SORTv1 : pointe hiver



Reserves Cinétiques

BAU, PROGt1, SORTt1 : pointe hiver



Reserves Magnetiques

BAU, PROGv1, SORTv1 : pointe hiver

